

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie électrique et de génie informatique

Étude d'un procédé d'amincissement abrasif
pour la fabrication de cellules solaires minces
triple-jonctions III-V/Ge

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie électrique

Élie COBO

Sherbrooke (Québec) Canada

Août 2019

MEMBRES DU JURY

Vincent AIMEZ

Directeur

Maxime DARNON

Codirecteur

Serge ECOFFEY

Évaluateur

Abdelatif JAOUAD

Rapporteur

RÉSUMÉ

Les cellules photovoltaïques multi-jonctions sont des cellules solaires à très haut rendement. Elles sont historiquement utilisées dans le domaine spatial, notamment sur les satellites, mais aujourd'hui leur domaine d'application s'est étendu jusque sur terre dans le cadre de fermes solaires. Malheureusement, leur coût de fabrication reste une grosse contrainte et limite leur application. C'est avec la technologie du photovoltaïque concentré (CPV), utilisant concentrateurs et systèmes de suivi solaire, que ce type de cellules devient compétitif sur le marché. Cette étude propose de s'intéresser à l'amincissement de cellules solaires multi-jonctions. Les perspectives et les intérêts envisagés de cet amincissement sont prometteurs. Cela pourrait permettre une meilleure gestion de la chaleur induite par la concentration du soleil et une diminution de la résistance série. De plus, la démonstration de cellules amincies avec un rendement équivalent aux cellules standards donnerait encore plus d'intérêt au développement de procédé de recyclage du substrat en vue de réduire le coût de fabrication. Ce procédé pourrait également permettre de réduire le poids de la cellule, ce qui serait très profitable au domaine spatial où la production électrique par unité de surface et de poids doit être maximisée. En nous inspirant des technologies 3D sur silicium, qui utilisent déjà des substrats amincis, nous allons mettre en place un protocole d'amincissement abrasif de substrat en germanium et l'intégrer dans le processus de fabrication de cellules triple-jonctions. Nous présenterons la caractérisation et la mise en fonctionnement d'un outil d'usinage par abrasion désormais disponible au 3IT. Les résultats obtenus sur des gaufres de Silicium seront présentés afin de fournir une vue générale des capacités de l'instrument. L'influence de différents paramètres (notamment de la vitesse d'amincissement) sur la rugosité de surface et sur l'homogénéité de l'amincissement, seront étudiées. Nous verrons ensuite son application à l'amincissement de substrat en Germanium avec le développement d'un procédé de fabrication de cellules solaires minces triple-jonctions comprenant, le collage sur gaufres de Silicium, l'amincissement abrasif et le collage métallique de report. Nous montrerons qu'il est possible d'amincir le substrat en Germanium, d'un empilement de matériaux III-V, avec un usinage par abrasion (le meulage), en mettant notamment en évidence l'importance de la planéité du collage sur la gaufre support. Nous verrons également que la méthode d'amincissement par abrasion peut sévèrement endommager la structure et causer des fissurations, que nous pouvons contrôler avec la vitesse d'amincissement et l'épaisseur de polymère utilisé comme collage. Enfin nous démontrerons l'amincissement d'une cellule photovoltaïque réduisant l'épaisseur de son substrat de $170\text{ }\mu\text{m}$ à $40\text{ }\mu\text{m}$.

Mots-clés : amincissement, abrasifs, polissage, germanium, substrat, photovoltaïque concentré, cellules solaires multi-jonctions, meulage

REMERCIEMENTS

Les travaux de recherche ont été réalisés au Laboratoire de Nanotechnologie et Nanosystèmes (LN2) à l'Institut Interdisciplinaire d'Innovation Technologique (3IT) de l'Université de Sherbrooke. Je tiens à remercier Vincent Aimez et Maxime Darnon qui m'ont offert l'opportunité d'effectuer ces travaux sous leur direction. Je remercie également TOP-SET pour leur soutien financier.

Si ces travaux se sont déroulés dans un cadre propice à l'enrichissement scientifique c'est avant tout grâce aux personnes dirigeant le groupe CPV-microfab au sein duquel j'ai eu la chance d'évoluer. Alors je remercie Maïté Volatier, Abdelatif Jaouad et Maxime Darnon pour leur aide constante, leur disponibilité et les discussions hebdomadaires qui ont permis à ces travaux d'aboutir.

Je remercie également tous les membres du groupe qui ont participé à ces travaux, Clément, Xavier, Pierre, François, Gwenaëlle. Je remercie l'équipe technique du LN2 sans qui les travaux dans les laboratoires seraient impossibles, un merci tout particulier à Daniel pour son aide précieuse pour la mise en fonctionnement de la machine d'usinage abrasif.

Je remercie ma famille de m'avoir supporté toutes ces années et de continuer de le faire dans les projets que j'entreprends. Malgré la distance qui nous séparait, je n'ai jamais cessé de sentir leur amour et leur encouragement.

Je remercie mes amis de voyage au Québec qui ont permis de rendre mon expatriation plus plaisante.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Mise en contexte et problématique	1
1.2	Définition du projet de recherche	2
1.3	Objectifs du projet de recherche	2
1.4	Contributions originales	3
1.5	Plan général du document	3
2	Etat de l'art, méthodologie et question de recherche	5
2.1	Cellule triple jonction InGaP/InGaAs/Ge	5
2.1.1	Principe de base	5
2.1.2	Epaisseur du substrat en germanium	6
2.1.3	Intérêt de l'amincissement du substrat	8
2.1.4	Problématique de l'amincissement du substrat	9
2.2	Les procédés d'amincissement	11
2.2.1	Amincissement par plasma inductif SF_6 (gravure sèche)	12
2.2.2	Amincissement chimique (gravure humide)	12
2.2.3	Amincissement mécanique abrasif (meulage)	13
2.2.4	Les applications de l'amincissement de substrat	18
2.3	Problématique, question de recherche et objectifs	20
3	Mise en fonctionnement et caractérisation d'un outil d'usinage par abrasion	23
3.1	Méthodologie de la caractérisation de l'amincissement	23
3.2	Caractérisation de l'amincissement par abrasion	25
3.3	Caractérisation de la rugosité	27
3.4	Caractérisation du profil d'épaisseur	32
3.4.1	Wafers amincis à $5 \mu\text{m}/\text{min}$:	34
3.4.2	Wafers amincis à 20, 30 et $50 \mu\text{m}/\text{min}$	37
3.4.3	Bilan de la caractérisation	40
3.5	Application de l'amincissement abrasif à un substrat de Germanium	43
4	Amincissement d'une cellule photovoltaïque	45
4.1	Protocole de fabrication d'une cellule triple jonction amincie.	45
4.2	Procédé de collage pour amincissement d'échantillon	46
4.2.1	Méthode de collage	48
4.3	Amincissement de matériaux III-V/Ge	53
4.3.1	Amincissement abrasif	53
4.3.2	Amincissement chimique	59
5	Collage permanent, et caractérisation d'une cellule solaire amincie	65
5.1	Collage métallique face arrière permanent	65

5.2	Fabrication d'une cellule solaire amincie	70
6	CONCLUSION	75
A	Guide d'utilisateur	77
	LISTE DES RÉFÉRENCES	85

LISTE DES FIGURES

2.1	Architecture cellule d'une photovoltaïque triple jonction et son spectre d'absorption.	6
2.2	Coefficient d'absorption de différent matériau à 300K en fonction de la longueur d'onde dans le vide de la lumière	7
2.3	Schéma illustrant l'application de l'amincissement du substrat en germanium aux structures TCVC	9
2.4	Schéma illustrant la recombinaison de surface en fonction de l'épaisseur du substrat	9
2.5	Graphique de recombinaison de surface en fonction de l'épaisseur du substrat	10
2.6	Schéma du process de fabrication d'une cellule triple jonction amincie . . .	11
2.7	profil d'un amincissement plasma SF_6	12
2.8	Gouttelette et bulles à la surface de germanium aminci par voie chimique .	13
2.9	Procédés d'usinage par abrasion et cinématique des grains abrasifs	14
2.10	Principe de fonctionnement Blanchard-type wafer grinding.	15
2.11	Longueur de contact entre une meule et un wafer dans un grinder type Blanchard	15
2.12	Illustration d'un set-up de grinder pour obtenir une meilleure planéité . . .	16
2.13	Rugosité en fonction de la vitesse d'amincissement (feed rate) et de la profondeur de passe (doc)	17
2.14	Variation d'épaisseur d'un wafer 300mm après amincissement jusqu'à 50 μm d'épaisseur restantes par abrasion mécanique	19
2.15	Mesure de profil par interférométrie de la surface polie	20
3.1	Profil brut d'une mesure de surface	23
3.2	Profil R et W filtré d'une mesure de surface	24
3.3	Image de l'instrument d'usinage par abrasion présent au 3IT.	25
3.4	Calibration de la vitesse de rotation du plateau à gaufres.	26
3.5	image et mesure de profilomètre prises sur (a)(c) une surface non amincie et (b)(d) une surface amincie.	28
3.6	Observation au MEB d'une surface amincie à 1 $\mu m/min$ avec une vitesse de plateau de 1 rpm.	29
3.7	Définition de la rugosité Ra et Rt.	29
3.8	Rugosité Ra en fonction de la vitesse d'amincissement avec une vitesse de plateau fixé à 21.1 rpm.	30
3.9	Rugosité Rt en fonction de la vitesse d'amincissement avec une vitesse de plateau fixé à 21.1 rpm.	31
3.10	Rugosité Ra en fonction de la vitesse de rotation du plateau à gaufres, (a) vitesse d'amincissement fixée à 1 $\mu m/min$, (b) vitesse d'amincissement fixée à 5 $\mu m/min$	31
3.11	Illustration de la méthode de mesure du profil d'épaisseur.	33

3.12	profil d'épaisseur du wafer référence 1, (a) obtenu par mesure au microscope électronique, (b) par mesure au microscope optique.	33
3.13	profil d'épaisseur mesuré au microscopre optique (a) du wafer référence 1 et (b) du wafer référence 2.	34
3.14	Profil d'épaisseur des wafer amincis à 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ et à une vitesse de plateau de a) 1 RPM, b) 9.7 RPM, c) 21 RPM.	35
3.15	Total thickness variation (TTV) en fonction de la vitesse de rotation du support (vitesse d'amincissement : 5 $\mu\text{m}/\text{min}$, quantité amincie : 10 μm).	36
3.16	Écart-type en fonction de la vitesse de rotation du support (vitesse d'amincissement : 5 $\mu\text{m}/\text{min}$, quantité amincie : 10 μm).	36
3.17	Profil d'épaisseur des wafers amincis à 20 $\mu\text{m}/\text{min}$	37
3.18	Profil d'épaisseur des wafers amincis à 30 $\mu\text{m}/\text{min}$	38
3.19	Profil d'épaisseur des wafers amincis à 50 $\mu\text{m}/\text{min}$	38
3.20	Total thickness variation (TTV) en fonction de la vitesse d'amincissement.	39
3.21	Écart-type en fonction de la vitesse d'amincissement.	40
3.22	Photos d'une gaufre de Germanium amincie a) sur le support à wafers avec le vide, b) sortie de la machine d'amincissement.	43
3.23	Comparaison entre une surface amincie (a) de Germanium et (b) de Silicium.	44
4.1	Procédé de fabrication d'une cellule triple jonction amincie.	46
4.2	Schémas d'une cellule collée sur un support avant amincissement.	47
4.3	Photo du montage de collage.	48
4.4	Photo illustrant le collage par disposition de résine AZ1512 sur un échantillon.	49
4.5	Photo illustrant le collage par étalement de résine AZ1512 sur une gaufre.	50
4.6	Photo illustrant le collage par disposition de CR200 sur un échantillon.	50
4.7	Schéma d'un procédé de collage pour un amincissement de cellule photovoltaïque avec structure TCVC.	51
4.8	Photo illustrant le collage par étalement de PDMS sur un échantillon.	51
4.9	Schémas illustrant un échantillon et les 6 points de mesure de rugosité.	52
4.10	Graphique représentant la rugosité R_a de différentes méthodes de collage.	53
4.11	Image au microscope électronique à balayage des matériaux d'une cellule triple jonction classique.	54
4.12	Photo d'un échantillon III-V/Ge aminci à une vitesse de 30 $\mu\text{m}/\text{min}$ puis 5 $\mu\text{m}/\text{min}$	54
4.13	Photo d'un échantillon III-V/Ge prise après amincissement à une vitesse de, a) 10 $\mu\text{m}/\text{min}$ puis 2 $\mu\text{m}/\text{min}$, et b) à une vitesse de 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ puis 2 $\mu\text{m}/\text{min}$ pour les 20 derniers μm de Germanium amincis.	55
4.14	Schéma illustrant l'importance de la planéité du collage pour l'amincissement.	55
4.15	Illustration de la corrélation entre l'épaisseur en μm mesurée sur quatre bords, et les brisures après amincissement.	56
4.16	Schéma des mesures de planéité du collage avec un meilleur contrôle dans la manipulation du procédé.	57
4.17	détails des paramètres d'amincissement pour l'échantillon avec un collage amélioré.	57

4.18	Photo après amincissement du collage avec une meilleur planéité.	58
4.19	Mesure de profil et photo au microscope optique d'un bord d'un échantillon aminci.	58
4.20	Schéma de l'installation de la gravure chimique.	59
4.21	mesures au profilomètre mécanique d'un échantillon aminci avec 40 μm de Germanium restant a) avant gravure chimique, b) après gravure chimique.	60
4.22	mesure au profilomètre, à plusieurs étapes d'amincissement, du profil de largeur de deux échantillons amincis.	61
4.23	Photo de la surface de germanium aminci puis gravée pendant 1h dans la solution H_2O_2	62
4.24	Mesure d'un profil de rugosité a) après l'amincissement mais avant la gravure chimique et b) après 1 heure de gravure chimique.	62
4.25	cracks dans le III-V d'un échantillon dont le germanium a été complètement aminci.	63
5.1	Schémas d'une cellule collé sur un support permanent avant et après report.	65
5.2	Schéma d'une cellule amincie (gauche) et d'un substrat (droite), métallisés.	66
5.3	Schéma de la mise en place d'un ruban d'indium pour le collage métallique.	66
5.4	Schéma d'un collage métallique au ruban d'Indium.	67
5.5	Profil de la CR200 remontant sur les bords de l'échantillon avec le ruban d'indium schématisé.	67
5.6	Report avec pression d'une cellule amincie (membrane III-V sans Ge).	68
5.7	Collage métallique sans poids d'un échantillon aminci (membrane III-V sans Ge).	68
5.8	Collage métallique Si sur verre (a) avec pression et flux, (b) sans pression avec flux, (c) sans pression sans flux.	69
5.9	collage métallique d'un échantillon aminci réussi.	70
5.10	schéma et photo d'une cellule triple jonction standard.	70
5.11	Cellule triple jonction collée sur superstrat temporaire	71
5.12	Cellule triple jonction collée sur superstrat temporaire et amincie par abrasion.	72
5.13	report de la cellule triple jonction amincie.	73

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Plan expérimental pour la caractérisation de l'amincissement abrasif	27
3.2	épaisseur moyenne et écart-type obtenus avec deux différentes méthodes de mesure	33
3.3	Épaisseur moyenne, écart-type et TTV obtenues pour deux gaufres de références	34
3.4	Épaisseur moyenne, écart-type et TTV obtenues pour des gaufres amincies à 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ à différente vitesse de rotation du plateau à gaufres.	35
3.5	Épaisseur moyenne, écart-type et TTV obtenues pour des gaufres amincies à 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ à différente vitesse de rotation du plateau à gaufres.	37
3.6	Épaisseur moyenne, écart-type et TTV obtenues pour des gaufres amincies à 30 $\mu\text{m}/\text{min}$ à différente vitesse de rotation du plateau à gaufres.	37
3.7	Épaisseur moyenne, écart-type et TTV obtenues pour des gaufres amincies à 50 $\mu\text{m}/\text{min}$ à différente vitesse de rotation du plateau à gaufres.	38
3.8	Bilan des différentes caractérisations.	42
4.1	Corrélation entre la quantité amincie, l'épaisseur de collage et l'apparition de cracks sur les matériaux III-V.	64

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Avec les enjeux planétaires du dérèglement climatique et les dangers environnementaux entourant notre société moderne, la recherche et le développement de nouvelles méthodes de production électrique deviennent fondamentaux. Parmi ces technologies, se trouvent le photovoltaïque et notamment les technologies de photovoltaïque concentré (CPV) basé sur l'utilisation des cellules photovoltaïques multi-jonctions à base des matériaux III-V/Germanium. Ces cellules ont des efficacités de conversions largement supérieures aux cellules standards en Silicium. En effet, constituées de plusieurs zones actives de différentes largeurs de bande interdite, les cellules multi-jonctions permettent d'absorber efficacement une plus grande partie du spectre solaire. En contrepartie elles ont l'inconvénient d'être coûteuses. C'est la raison pour laquelle, aujourd'hui, le marché du photovoltaïque est très majoritairement dominé par le Silicium, dont le coût de fabrication est beaucoup plus faible.

Le photovoltaïque concentré (CPV) est basé sur le principe qui consiste à concentrer les rayons lumineux du soleil sur une plus petite surface à l'aide de miroirs ou de lentilles. Les modules CPV sont montés sur un système de suivi solaire afin de pouvoir suivre le déplacement du soleil. Par ce moyen, la production coûteuse de grande surface de III-V n'est pas nécessaire, rendant ainsi la technologie compétitive, surtout dans les régions à fort ensoleillement direct.

1.1 Mise en contexte et problématique

Les cellules triple jonctions à base de III-V/Ge utilisent des substrats en Germanium de $170\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur. Cependant cette épaisseur n'est pas nécessaire pour la collection de photons, car seulement quelques micromètres suffisent pour l'absorption du flux de lumière nécessaire pour adapter le courant (current matching) de la sous-cellules de Ge par rapport aux sous-cellules du milieu et du haut. Il est important donc d'investiguer les approches permettant de fabriquer des cellules triple jonctions avec des sous cellules de Ge assez minces qui ne dépassent pas des épaisseurs de quelques microns ($1\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$). Depuis quelques années, quelques groupes de recherches dans le monde ont commencé à travailler sur des procédés qui permettraient de séparer la cellule III-V/Ge du substrat

de Germanium. La récupération du substrat permettrait de le réutiliser pour faire la croissance des structures III-V plusieurs fois en partant d'un seul wafer Ge.

1.2 Définition du projet de recherche

La réutilisation du substrat de Ge dans une structure triple jonction III-V/Ge nécessite la mise au point de techniques qui permettront de séparer l'ensemble des 3 sous cellules du substrat. Au 3IT-Sherbrooke des travaux sont menées depuis plusieurs années selon une approche basée sur la technique de lift-off en utilisant un procédé de porosification du Ge. L'idée est de porosifier le wafer de Ge, de faire la croissance épitaxiale des matériaux III-V ensuite fabriquer la cellule solaire en utilisant des procédés qui intègrent le lift-off et le transfert sur un substrat mécanique. Si du point de vue théorique, on sait que l'épaisseur du substrat peut être limitée à quelque micromètre, plusieurs questions de recherche restent à étudier pour mettre en évidence ce concept du point de vue expérimental. Parmi ces questions :

- (i) On doit savoir quelle est l'épaisseur minimale de Ge qui peut être optimale pour manipuler les substrats durant les opérations de séparation/transfert.
- (ii) Est-ce que les cellules minces auront des performances identiques aux cellules standards et qu'il n'y a pas de perte d'efficacité de conversion associée à ce concept et aux procédés de fabrication qui l'accompagnent.

Dans ce projet on ne travaillera pas sur les procédés de lift-off, mais on essaiera de démontrer si la cellule mince qui sera obtenue par les procédés d'amincissement mécanique et qui sera fabriquée avec des procédés de transfert sera fonctionnelle avec des performances comparables à la cellule standard.

1.3 Objectifs du projet de recherche

Dans ces travaux de maîtrise, nous nous sommes intéressés à la question de l'amincissement du substrat en Germanium de ces cellules triple jonctions. Nous avons, en effet, étudié la possibilité d'introduire un procédé d'amincissement par meulage dans leur fabrication. Notre objectif principal était de démontrer l'intérêt des cellules minces, en montrant qu'elles peuvent présenter des performances comparables aux cellules standards. Les perspectives seraient, par la suite, d'obtenir des cellules minces avec un procédé permettant de recycler le Germanium et par conséquent de réduire leur coût de fabrication. Un second objectif était de développer un procédé d'amincissement qui pourrait être utilisé dans la fabrication de nouvelles architectures telles que les TCVCs (through cell via contact) qui

visent à remplacer les métallisations de l'électrode en face avant par des vias métalliques transférant le contact en face arrière.

1.4 Contributions originales

Ces recherches ont donc permis de démontrer les possibilités ainsi que les limites de l'aminçissement par meulage de cellules triple jonctions en fabricant des cellules photovoltaïques minces. Nous avons réduit l'épaisseur du substrat de $170\text{ }\mu\text{m}$ à $40\text{ }\mu\text{m}$, et nous avons mis en évidence l'apparition de fissurations causées par le meulage, que nous pouvons éviter en contrôlant l'épaisseur amincie, la vitesse d'aminçissement et l'épaisseur du collage sur le support mécanique.

1.5 Plan général du document

Après cette introduction, nous allons présenter au chapitre 2 une synthèse de l'état de l'art de l'aminçissement de substrat, en discutant également de la possibilité et de l'intérêt d'amincir des cellules triple jonctions. Nous nous attarderons spécifiquement sur le Germanium, matériau du substrat des cellules triple jonctions. Puis, nous développerons dans le chapitre 3 la mise en fonctionnement et la caractérisation d'un outil de meulage présent au 3IT, et nous démontrerons la possibilité d'amincir des gaufres 4 pouces ainsi que des petits échantillons en Silicium. Après cela nous présenterons le transfert de ce procédé vers l'aminçissement de substrat en Germanium de petite dimension (1 cm^2). Le chapitre 4 traite le procédé de collage temporaire et de l'aminçissement d'une cellule triple jonction III-V/Ge, alors que le collage permanent de la structure amincie sur un superstrat et la fabrication complète de la cellule CPV amincie est traité dans le chapitre 5.

CHAPITRE 2

Etat de l'art, méthodologie et question de recherche

2.1 Cellule triple jonction InGaP/InGaAs/Ge

2.1.1 Principe de base

Les cellules solaires simples se composent d'un semi-conducteur formant une jonction P-N. Lorsqu'un photon incident entre en contact avec le matériau, un électron absorbe son énergie, il est alors arraché de l'atome et se trouve dans un niveau d'énergie supérieur. Il participe à la conduction électrique.

Les cellules solaires simples se composent d'un semi-conducteur formant une jonction P-N. Lorsqu'un photon incident entre en contact avec le matériau, un électron absorbe son énergie, il est alors arraché de l'atome et se trouve dans un niveau d'énergie supérieur. Il participe à la conduction électrique. Pour pouvoir absorber un photon, il faut que son énergie soit supérieure à celle de la bande interdite du matériau. Autrement dit, la cellule n'est pas capable de convertir les photons de plus faible énergie que sa bande interdite en courant électrique. Sachant cela, il peut être tentant de choisir un matériau ayant cette bande d'énergie très faible, dans l'idée de convertir un plus large spectre lumineux. Malheureusement, le phénomène de thermalisation limite cette pratique. En effet quand un matériau absorbe un photon d'énergie plus grande que sa bande interdite, l'énergie supplémentaire est perdue (sous forme de chaleur par exemple). Les électrons possèdent donc toujours un potentiel d'énergie proche de l'énergie de la bande interdite.

Pour résumer, un photon d'énergie inférieure à la bande interdite du matériau semi-conducteur ne peut pas être absorbée et un photon d'énergie supérieure est absorbée en perdant son énergie excédentaire.

Par conséquent, le meilleur rendement est obtenu pour les longueurs d'onde absorbées correspondant des énergies de photon exactement égale à l'énergie de la bande interdite. Le spectre du soleil n'étant pas monochromatique et donc se composant de plusieurs longueurs d'onde, cela représente une grosse limitation pour la technologie utilisant des mono-jonctions, par exemple en Silicium. C'est pour pallier cette limite que la technologie multi

jonctions[1] a vu le jour. Le principe est d'empiler plusieurs couches de semi-conducteurs avec différentes bandes interdites. Ces différentes couches auront pour objectif d'absorber une région spécifique du spectre solaire correspondant à des énergies proches de celle de leur bande interdite. Dans le cas de la cellule triple jonction, on choisit des matériaux dont la bande interdite cible trois zones différentes du spectre solaire (figure 2.1).

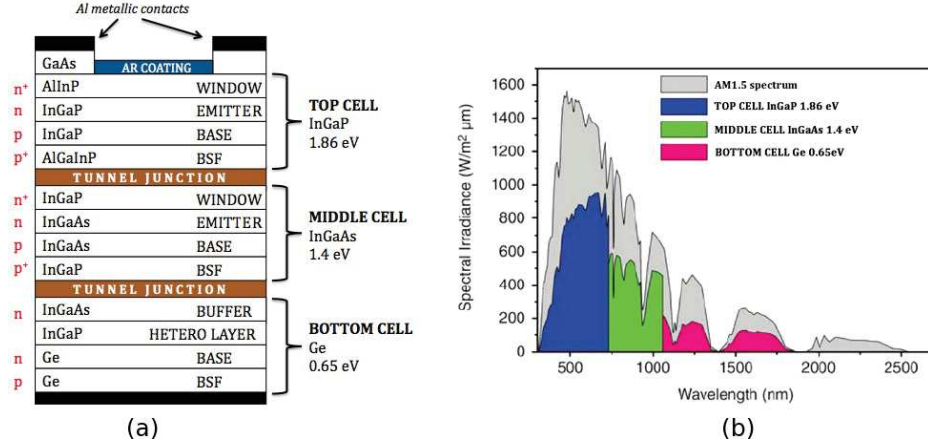


Figure 2.1 Architecture d'une cellule photovoltaïque triple jonction et son spectre d'absorption.[2]

2.1.2 Epaisseur du substrat en germanium

Les cellules multi jonctions étudiées dans le cadre de ces recherches se composent de trois jonctions : InGaP/InGaAs/Ge

L'architecture classique de ce type de cellules photovoltaïques se constitue d'un substrat en germanium sur lequel on opère une croissance épitaxiale de plusieurs couches de matériaux III-V[3]. L'épaisseur du substrat de Germanium est typiquement de $170 \mu\text{m}$. Or, la partie active du substrat en germanium n'est que de quelques μm . En effet, les porteurs collectés sont principalement ceux qui sont générés proches de la jonction P-N, qui elle se trouve à environ 500 nm de la jonction tunnel. Pour un dopage de l'ordre de $1,5 \text{ à } 2,5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, qui est de l'ordre de grandeur des substrats en germanium des cellules III/V sur Ge, la longueur de diffusion des porteurs minoritaires est de $73 \mu\text{m}$ [4]. Par conséquent, même si des porteurs sont générés à plus de $73 \mu\text{m}$ de la jonction, ils ne pourront pas être collectés. Vérifions maintenant à quelle distance est absorbé le rayonnement infrarouge que l'on cherche à collecter avec la jonction du Germanium. Sur la figure 2.2 est représenté le coefficient d'absorption α d'un matériau en fonction de l'énergie des photons incidents. Son inverse correspond à la distance à partir de laquelle un photon d'une certaine longueur d'onde est absorbé à 74% de son intensité initiale.

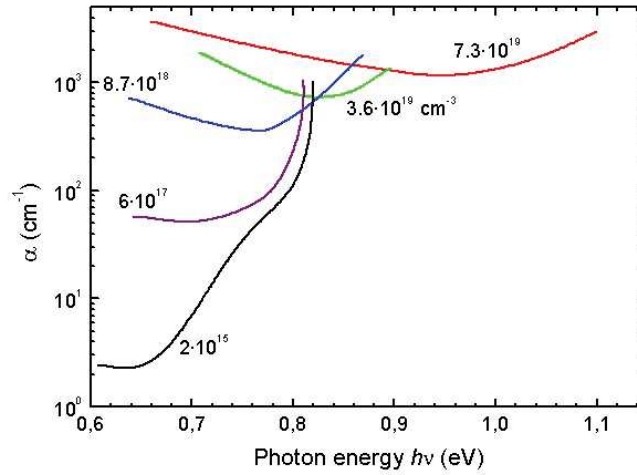


Figure 2.2 Coefficient d'absorption du germanium à 297K en fonction de son taux de dopage en Ga et de l'énergie des photons absorbés[5]

On remarque que pour un taux de dopage de l'ordre de $6 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, le coefficient d'absorption minimum est de $5 \cdot 10^1 \text{ cm}^{-1}$ ce qui correspond à une profondeur minimale de 200 μm . Si l'on s'intéresse maintenant au rayonnement de 1600 nm de longueur d'onde, soit une énergie d'environ 0.77 eV (le spectre solaire ne rayonnant que très peu au-delà), on remarque que la distance d'absorption est de 111 μm .

En conclusion, la longueur de diffusion des porteurs est inférieure à la longueur d'absorption de l'infrarouge du germanium dopé dans les ordres de grandeur autour des 10^{17} cm^{-3} . Les rayons absorbés à une distance de la jonction plus grande que la longueur de diffusion n'étant pas collectés, c'est cette longueur de diffusion des porteurs qui nous donnera la limite à partir de laquelle on commencera à perdre en courant collecté, soit environ 70 μm .

Cependant, la jonction en germanium fournit beaucoup plus de courant que les autres jonctions, par exemple dans cet article[6], la jonction en germanium fournit un courant de $42,4 \text{ mA/cm}^2$, la jonction en GaAs ne fournit qu'un courant de $15,6 \text{ mA/cm}^2$ et la jonction en InGaP fournit quant à elle un courant de $22,1 \text{ mA/cm}^2$ (ces valeurs dépendent de l'optimisation des épaisseurs de couches, qui peuvent varier selon les constructeurs, mais la jonction Germanium reste toujours celle fournissant le plus de courant). Or le courant total délivré par la cellule solaire est toujours limité par le plus faible courant des trois jonctions, car les jonctions sont reliées en série. Le courant excédentaire de la jonction en Germanium est donc de toute façon perdu par effet joule. Dans ce cas, on peut se permettre de réduire l'épaisseur du germanium. C'est pour cette raison qu'il sera possible d'en réduire l'épaisseur en dessous des 70 μm annoncés précédemment.

2.1.3 Intérêt de l'amincissement du substrat

La gestion de la chaleur générée par la concentration des rayons solaires est une grande difficulté rencontrée par le CPV. C'est un facteur limitant de la technologie.

La résistance thermique de conduction d'un matériau d'épaisseur e s'exprime comme suit : $\frac{e}{\lambda * S}$, avec λ la conductivité thermique du matériau (en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et S sa surface de conduction (en m^2). Par conséquent, en réduisant son épaisseur, on réduit également sa résistance thermique. La réduction de l'épaisseur de la cellule sur laquelle les rayons sont concentrés favorisera l'évacuation de chaleur. Il est plus facile de refroidir un substrat lorsqu'il est de faible épaisseur.

De même, par analogie avec la résistance thermique, réduire l'épaisseur de la cellule va conduire à une baisse de sa résistance électrique : $\rho * \frac{e}{S}$ avec ρ la résistivité du matériau (en $\Omega.\text{m}$), e son épaisseur (en m) et S la surface de conduction en (m^2). Cela permet donc limiter les pertes par effet joule.

De plus, la réduction de l'épaisseur s'associe à la réduction du poids total de la cellule. Le système devient alors plus facilement embarquable, caractéristique souhaitable notamment dans le domaine de l'aérospatial.

Toujours dans l'objectif d'améliorer les performances des cellules triple-jonctions, l'amincissement de substrat pourrait être utile pour la fabrication de cellule solaire avec de nouvelles structures d'électrodes. En effet, parmi les travaux sur les cellules triples jonctions en cours, ceux de Mathieu De LaFontaine au sein du groupe CPV du laboratoire LN2 visent à transférer les contacts de la face avant en face arrière afin de libérer plus de surface active au contact des rayons lumineux. Cette nouvelle architecture se fonde sur la technologie : through cell via contact[7]. L'objectif de ses travaux est donc de graver des vias traversant la cellule. Une des difficultés majeures de la fabrication de telles cellules est le fort rapport d'aspect des vias (rapport entre la longueur et le diamètre des vias). Réduire l'épaisseur du substrat permettra de réduire la longueur des vias et par conséquent leur rapport d'aspect, facilitant de fait leur fabrication (figure 2.3). Par exemple pour des vias de diamètres de $10\text{ }\mu\text{m}$, un amincissement du substrat de $170\text{ }\mu\text{m}$ à $25\text{ }\mu\text{m}$ permettrait de réduire le rapport d'aspect de 17 à 2,5.

Pour finir, recycler la partie du substrat amincie pourrait grandement réduire le coût de fabrication de la cellule, ceci étant possible avec des procédés de séparation de substrat tels que l'epitaxial lift-off[8], le spalling contrôlé[9] ou encore en utilisant le Germanium poreux[10].

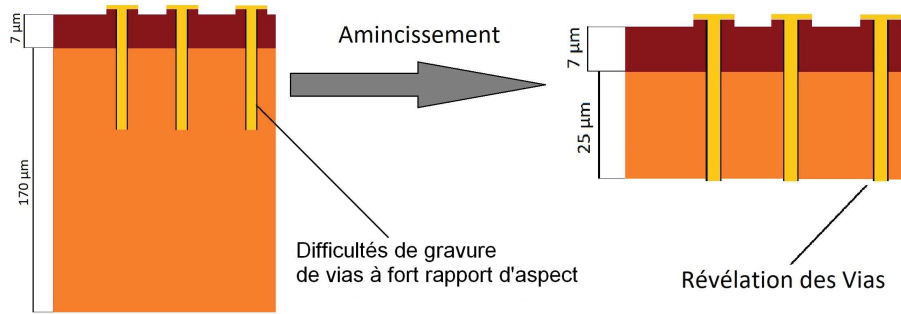


Figure 2.3 Schéma illustrant l'application de l'amincissement du substrat en germanium aux structures TCVC pour cellule triple jonctions III/V sur Ge

2.1.4 Problématique de l'amincissement du substrat

Comme nous l'avons vu, seuls quelques micromètres de germanium sont nécessaires pour absorber la partie du spectre souhaité, ainsi l'épaisseur active de la « bottom cell » comme vu dans la figure 2.1 ne représente qu'une petite épaisseur de la totalité du substrat en germanium.

Lorsqu'une paire électron/trou est générée dans le substrat p-Ge, les porteurs minoritaires diffusent. Comme illustré figure 2.4, si la longueur de diffusion L_D est plus petite que l'épaisseur W_{ge} du Germanium, alors le risque de recombinaisons en surface arrière S_b est faible, puisque la majorité des porteurs n'atteignent pas la surface arrière du substrat. En réduisant l'épaisseur W_{ge} , on réduit le risque de recombinaison dans le volume, mais on augmente par la même occasion le risque de recombinaison en surface arrière, la surface arrière du substrat étant maintenant atteignable par les porteurs. Or, la durée de vie des porteurs en surface est toujours inférieure à leur durée de vie dans le volume[11], cela est dû aux états de surface qui jouent le rôle de pièges à électrons. Amincir pourrait donc

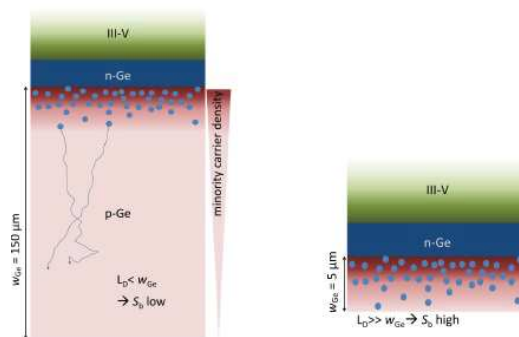


Figure 2.4 Schéma illustrant recombinaison de surface en fonction de l'épaisseur du substrat[12]

être synonyme d'une augmentation du taux de recombinaison. Les travaux de Schicho et al.[12], montrent qu'une passivation (ici par effet de champ) de la surface arrière d'une cellule amincie permet de limiter les recombinaisons de surfaces. Les simulations montrent même un gain de 3% en efficacité pour les cellules de 7 μm d'épaisseur avec traitement de surface.

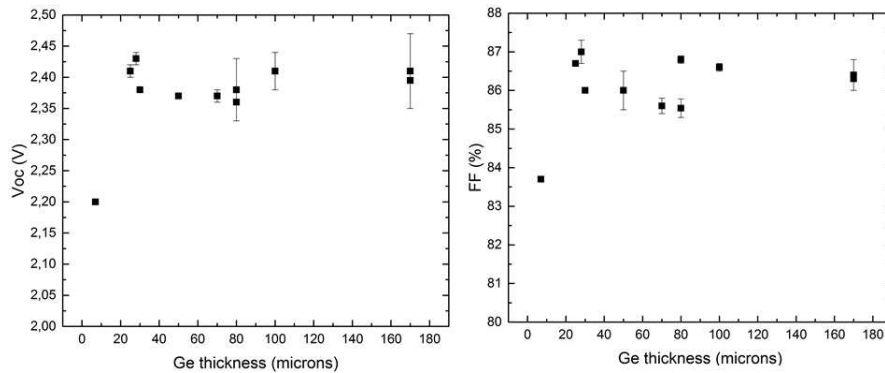


Figure 2.5 Graphique du Voc (Open-Circuit Voltage) et du FF (Fill Factor) de cellules multi-jonctions en fonction de l'épaisseur de leur substrat[13]

Par ailleurs, les travaux de Colin et al.[13], démontrent l'absence de perte significative lors de la réduction du substrat de Germanium jusqu'à 25 μm d'épaisseur, même sans passivation (Figure 2.5). Dans le cadre de nos recherches, nous pourrions donc espérer amincir le substrat en Germanium pour obtenir une épaisseur de 25 μm sans détérioration des performances.

Pour conclure sur les cellules triple-jonctions minces, le domaine spatial est le domaine historique d'utilisation de la technologie solaire multi jonctions, c'est donc dans ce cadre que l'on trouve les premières grandes avancées[14]. L'évolution logique de ces cellules pour le spatial tend vers une diminution de leur l'épaisseur et de leur poids. Dans ce cas[15], des cellules triple-jonctions minces sont étudiées et comparées à des cellules CIGS (Cuivre, Indium, Gallium, Sélénium) qui servent de références en tant que cellules photovoltaïques minces de haute efficacité. L'article démontre la possibilité et l'intérêt, pour le domaine spatial, d'amincir les cellules III/V sur Ge et de les intégrer sur support flexible. Malheureusement les auteurs ne présentent pas la méthode d'amincissement. Finalement cet article nous permet de disposer d'un exemple d'application de cellule triple jonction amincie et de sa mise en oeuvre. D'après les auteurs, les performances obtenues donnent une bonne perspective au futur des cellules amincies. Notre projet a pour ambition d'obtenir des épaisseurs de substrat inférieures aux 100 μm proposés dans cet article. La cible se trouvant plutôt à 30 μm d'épaisseur et inférieure.

2.2 Les procédés d'amincissement

Avant le procédé d'amincissement en tant que tel, il convient de s'intéresser à la problématique de l'intégrité mécanique de notre cellule amincie. En effet, avec une si faible épaisseur, le substrat ne sera plus capable de tenir son rôle de support mécanique. C'est une problématique souvent rencontrée lorsque l'on veut amincir un substrat. Dans la littérature la solution trouvée à ce problème est l'utilisation d'un « carrier » qui jouera le rôle de support à la place du substrat lorsque celui-ci sera aminci et incapable de tenir son rôle mécanique[16][17].

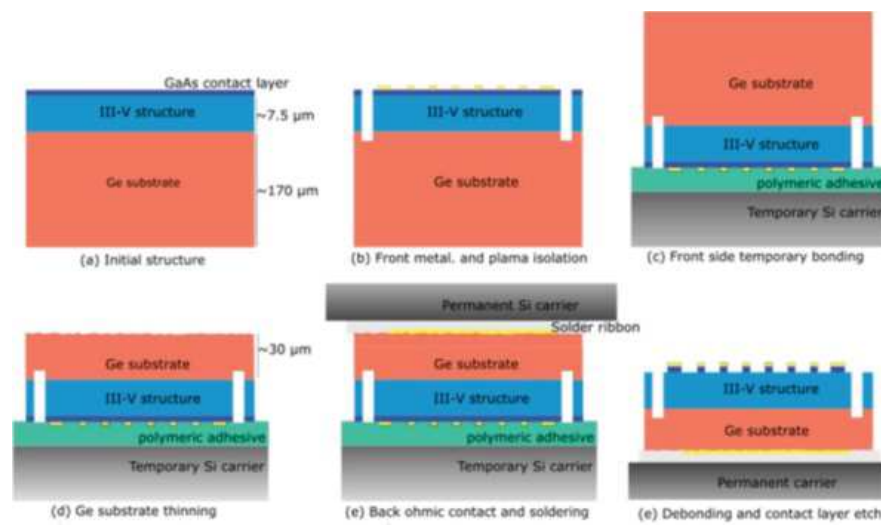


Figure 2.6 Schéma du process de fabrication d'une cellule triple jonction amincie[13]

Cette étape a été préalablement étudiée et développée par Clément Colin[13]. Un premier collage temporaire d'un support en face avant permettra la mise en place des étapes de fabrication de la face arrière, dont l'amincissement. Puis un collage permanent d'un second support sur la face arrière permettra la manipulation de la cellule finie. Le collage temporaire est ensuite retiré (voir figure 2.6). il est à noter qu'une alternative avec un collage sur un support permanent en face avant à également été étudié par Clément Laucher[18].

Nous savons désormais qu'il est possible et intéressant de travailler avec des cellules solaires triples jonctions amincies, intéressons nous alors aux différentes méthodes permettant d'amincir le substrat en Germanium.

Les sections suivantes présentent les techniques d'amincissement les plus standards, par plasmas, par voie humide et par meulage, sujet de ces travaux de maitrise.

2.2.1 Amincissement par plasma inductif SF_6 (gravure sèche)

Cette méthode consiste à mettre en contact le substrat avec un gaz ionisé (plasma). Deux phénomènes de gravure entre alors en jeux. Premièrement, les radicaux libres présent dans le plasma peuvent réagir avec la surface du substrat, ce qui constitue une gravure chimique. Deuxièmement, le substrat est bombardé par des ions positifs, ce qui constitue une gravure physique.

Plusieurs tests préalablement menés sur l'aminçissement par plasma SF_6 du germanium ont conduit vers des résultats peu concluants. Une répétabilité difficile à trouver et une gravure non homogène rendent le processus non utilisable.

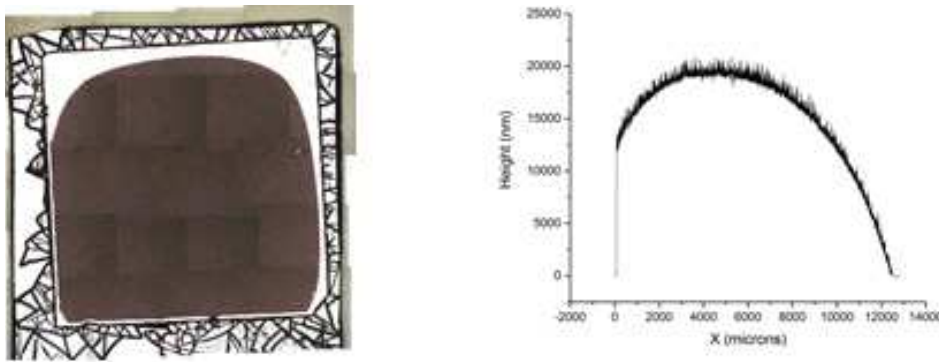


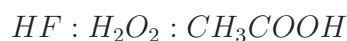
Figure 2.7 Profil d'un aminçissement plasma SF_6 , de Clément Colin

Comme on le remarque sur la mesure de profil de la figure 2.7 faite après aminçissement du Germanium au plasma SF_6 , on obtient une différence d'épaisseur de $20\text{ }\mu\text{m}$ sur une distance de $1,25\text{ cm}$. Ce n'est pas acceptable pour les applications que l'on veut en faire (notamment pour l'intégration TCVC vu au chapitre 2.1.3). L'aminçissement plasma n'est donc pas envisageable pour aminçir des épaisseurs conséquentes et obtenir une épaisseur de substrat inférieure à $30\text{ }\mu\text{m}$ (correspondant à un aminçissement de plus de $140\text{ }\mu\text{m}$ du substrat).

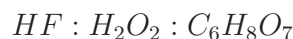
2.2.2 Amincissement chimique (gravure humide)

Cette possibilité est une alternative à l'aminçissement plasma. Avec cette méthode, pour enlever de la matière au substrat, on le fait réagir avec une solution chimique pour former des produits solubles.

La solution chimique[19] la plus efficace pour aminçir le germanium est :



on peut aussi utiliser,



Cependant, leur taux de gravure sur des substrats de cellules triple-jonctions n'est que de 2.1-2.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ [12], ce qui est très lent pour l'appliquer à notre cas. De plus, la gravure chimique combine les désavantages de ne pas être compatible, dans le cas de gravure longue, avec des supports en silicium ou en verre (support nécessaire au maintien mécanique de la structure pendant l'amincissement, voir figure 2.6) et de ne pas aboutir à une bonne qualité de surface amincie :

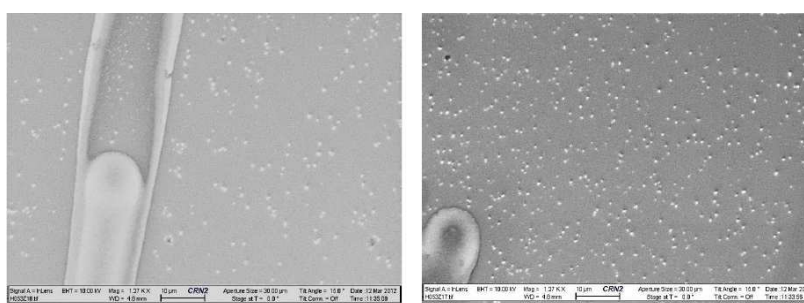


Figure 2.8 Gouttelette et bulles à la surface de germanium aminci par voie chimique, de Sandra Schicho

L'amincissement par gravure humide semble difficile à mettre en place étant donnée la durée conséquente du temps d'amincissement, à laquelle il faut rajouter le temps de préparation de la solution et de sa stabilisation (au moins 100 minutes). Toute la difficulté réside dans le contrôle du procédé sur une longue période d'utilisation (saturation de la solution en produit, évaporation de la solution...).

2.2.3 Amincissement mécanique abrasif (meulage)

Est une méthode d'amincissement bien connue du milieu industriel[20][21] et notamment dans la fabrication de wafer[22]. La technologie possède l'avantage d'être facile à mettre en place, d'être reproductible et peu chère.

Cette méthode permet d'amincir par application d'une force ou d'un couple à la surface d'un matériau. L'enlèvement de matière s'effectue à une échelle submicrométrique par des grains abrasifs. Il existe différentes méthodes d'usinage par abrasion. Voici la définition et la description des trois précédés donnés par *Techniques de l'ingénieur*[20] (voir figure 2.9) :

- **les procédés d'abrasion deux corps** (two-body abrasion) où les grains abrasifs sont solidaires d'un support : meule, bande, fil... Leur mouvement est identique à

celui des points de la surface du support (figure 2.9a). Appliqués contre la pièce par la force normale P exercée par le support, leur glissement produit l'enlèvement de matière (exemple : Le grinding ou le meulage en français) ;

- **les procédés d'abrasion trois corps** (three-body abrasion) : les grains abrasifs ne sont solidaires ni de la contre-pièce, ni de la pièce (figure 2.9b) ; leur mouvement est complexe, avec une composante de roulement et une composante de glissement. L'enlèvement de matière est contrôlé à l'aide de la force normale appliquée à la contre-pièce et éventuellement un liquide (exemple : Le polissage mécano-chimique, CMP) ;
- **les procédés par érosion** : les grains d'abrasif sont projetés à grande vitesse Δv sur la pièce et c'est leur énergie cinétique qui produit l'enlèvement de matière (e.g : sand blasting).

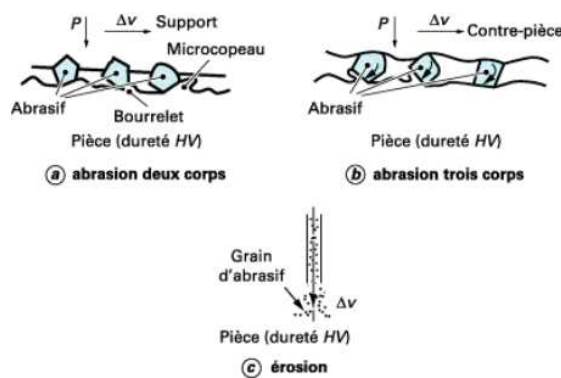


Figure 2.9 Procédés d'usinage par abrasion et cinématique des grains abrasifs[20]

Parmi ces trois procédés, les deux qui nous intéressent particulièrement sont les usinages à deux corps et à trois corps :

Les procédés d'abrasion à deux corps, sont les méthodes les plus efficaces pour donner une géométrie voulue à une pièce, ce sont les procédés qui permettent d'enlever le plus de matières. C'est ce que l'on utilise le plus souvent dans l'industrie du Silicium pour l'amincissement de wafers.

Procédé d'abrasion deux corps, le meulage (Grinding)

La première façon de "grinder" et d'utiliser une machine du type Blanchard[23][24][25]. Les wafers à amincir sont disposés le long de la circonférence d'un support tournant. Les abrasifs sont liés à une meule en rotation qui applique une pression sur les wafers.

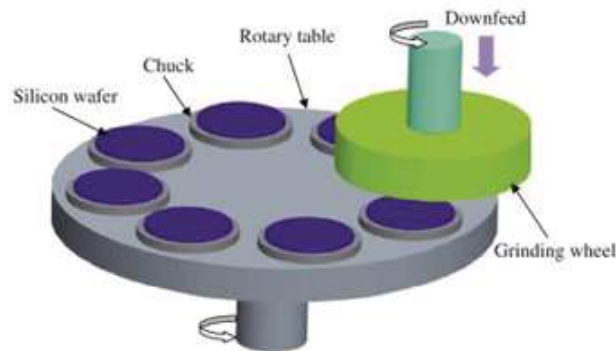


Figure 2.10 Principe de fonctionnement Blanchard-type wafer grinding.[23][24][25]

Ce genre de machine n'est pas capable de produire des surfaces planes, car la surface de contact entre la meule et les wafers n'est pas constante pendant que la pression appliquée reste quant à elle constante :

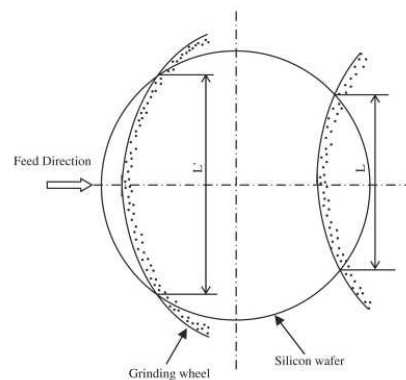


Figure 2.11 Surface de contact entre une meule et un wafer dans un grinder type Blanchard[22]

Suivant la direction d'amincissement (voir feed direction sur la figure 2.11), la surface variera de plus amincie à moins amincie au centre pour être de nouveau plus amincie. En somme le centre du wafer est toujours plus épais que les bords dans ce genre d'amincissement.

Pour pallier ce problème, plutôt que de mettre en rotation les wafers sur un grand support, on les fait tourner sur leur propre axe de rotation, comme illustré sur la figure 2.12. Cette fois la surface du contact entre la meule et le wafer reste constante pendant toute la durée de l'amincissement. Ainsi, on est capable d'obtenir une meilleure planéité de surface (TTV : Total Thickness Variation).

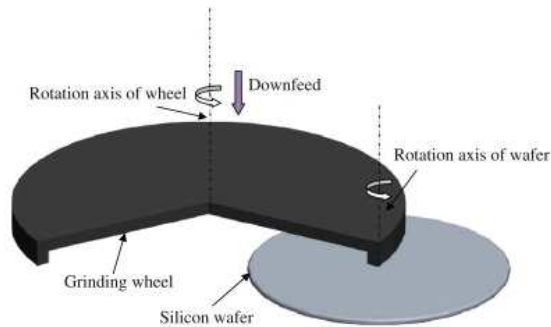


Figure 2.12 Illustration d'un set-up de grinder pour obtenir une meilleure planéité[22]

Cependant, en faisant tourner le wafer sur son axe on engendre d'autres problèmes qui ont été étudiés de près ces dernières années [26] [27] [28].

Par exemple, on obtient des wafers plus amincis au centre, car les points de surfaces se trouvant au centre du wafer restent en constant contact avec la tête d'amincissement, contrairement aux bords du wafers en rotation sur lui-même. Il existe des modèles cinétiques fiables[26] permettant la modélisation de l'aspect de surface final et les chercheurs ont trouvé des méthodes afin de minimiser ce phénomène, comme incliner le wafer pendant le processus.

La qualité de l'amincissement par grinding dépend de beaucoup de paramètres, tels que, le type de configuration entre meule/abrasif/wafer(deux ou trois corps, positionnement de la meule, inclinaison...), elle dépend également du matériau aminci (nature, orientation, forme[27], rugosité...), mais elle dépend encore du refroidissement utilisé (position et nature[28]). Par conséquent, il sera difficile d'appliquer une recette déjà établie dans la littérature et s'attendre à des résultats optimaux. Néanmoins, nous pourrions mettre à profit les connaissances déjà acquises dans le milieu pour orienter efficacement notre protocole expérimental, afin de déterminer les meilleurs paramètres :

1. La figure 2.13 montre une plus faible rugosité lorsque l'on diminue la vitesse d'amincissement sur le silicium monocristallin, sauf dans le cas des petites profondeurs de passe.
2. Dans le cadre de la fabrication de lentille asphérique[29], les meilleurs résultats de rugosité sur des surfaces en Germanium, en Silicium et en verre sont obtenus par des abrasifs liés avec de la résine.
3. Nous savons que le paramètre ayant un impact significatif sur la profondeur des fissures sous la surface du silicium amincis, est la dimension des abrasifs. Les autres pa-

ramètres sont peu significatifs. Les fissures dépendent de l'emplacement sur le wafer et sont grossièrement profondes de la moitié du diamètre des abrasifs en diamant[30].

4. Une partie de la surface d'un wafer de silicium cristallin, de quelques nanomètres d'épaisseur, devient amorphe après amincissement[31][32].

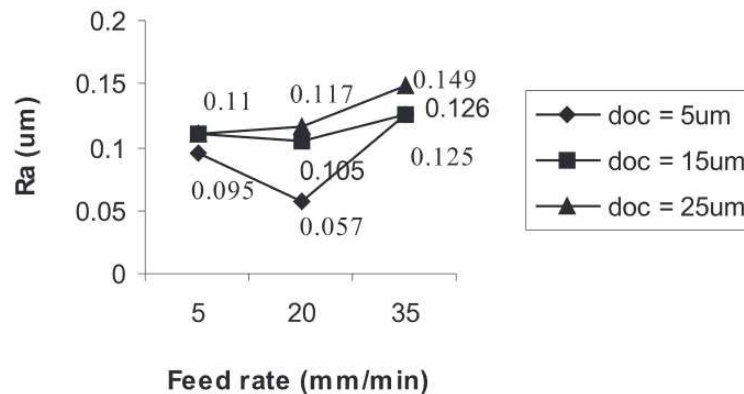


Figure 2.13 Rugosité en fonction de la vitesse d'amincissement (feed rate) et de la profondeur de passe (doc)[29]

En conclusion, les paramètres ayant un impact sur la qualité finale de la surface amincie sont :

- La vitesse de descente de la tête abrasive, qui dans notre cas correspond également à la vitesse d'amincissement.
- La vitesse de rotation de la tête abrasive.
- La vitesse de rotation des échantillons sur leur support
- La profondeur de passe (la quantité de matière enlevé par passage)
- La configuration des abrasifs (dureté, élasticité, taille, densité, liant)
- Le liquide de refroidissement (eau, eau+huile...)

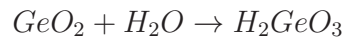
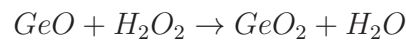
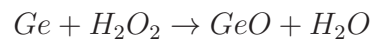
Les deux premiers paramètres ont un impact sur la rugosité finale de la surface[33]. La figure précédente en atteste également pour la vitesse d'amincissement et la profondeur de passe. Même si certaines études[33] montrent que la vitesse des wafers n'a pas d'impact sur la rugosité finale, ce paramètre est dans notre cas lié à la profondeur de passe qui elle influence la rugosité selon la figure 2.13. De plus la vitesse des wafers sur leur support influence la pénétration des défauts (comme les fissures) à l'intérieur du volume[34]. Les abrasifs quant à eux seront majoritairement responsable de la taille des défauts engendrés.

L'amincissement mécanique abrasif est un procédé déjà bien maîtrisé dans les technologies Silicium et notamment dans l'intégration 3D des systèmes électroniques. C'est aussi le procédé utilisé dans l'industrie du wafer pour l'amincissement. Bien que plus violent pour la

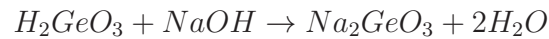
surface amincie, ce procédé est beaucoup plus robuste et industrialisable que les deux précédents déjà évoqués (plasma et chimique). Son faible coût le rend d'autant plus attractif. Le désavantage majeur de cette méthode d'amincissement sont les défauts engendrés. Pour remédier à cela, une étape supplémentaire de polissage pourrait être nécessaire. Il pourrait être envisagé de terminer l'amincissement par un polissage, applanissant ainsi la surface finale et permettant d'enlever la couche potentiellement endommagée par l'amincissement abrasif.

CMP, polissage à 3 corps

L'un des procédés de polissage du germanium est présenté dans cet article[35]. C'est un procédé à trois corps dans lequel la solution chimique (slurry) se compose de H_2O_2 , $NaOH$, et de particules de silice. L'oxydation du Germanium avec H_2O_2 se déroule en trois étapes :



Lorsque des ions OH^- sont présents dans la solution alors :



Les réactifs sont évacués par abrasion entre les particules de silice présent dans la solution et la surface du substrat en Germanium. Les paramètres optimaux du polissage du Germanium sont, un pH de 10, une concentration de 8% en H_2O_2 et de 10% en silice. Après un polissage de 120 min, on obtient une surface miroir de rugosité $Ra = 2$ nm.

Cette méthode permet d'obtenir une très bonne qualité de surface, mais la vitesse d'amincissement est de l'ordre de la dizaine de nanomètre par minute, faisant de cette méthode un procédé de finition (polissage) plutôt qu'un procédé d'amincissement pour de grandes épaisseurs.

2.2.4 Les applications de l'amincissement de substrat

Les TCVC appliqués au Silicium

Intéressons-nous à une récente application de l'amincissement présentée en introduction[7], soit celle de révéler des vias de contact passant à travers une cellule (TCVC).

Cette technologie est déjà largement utilisée dans le cadre de l'intégration 3D, l'amincissement est utilisé dans ce domaine pour révéler des vias gravés à travers un substrat. La méthode mise en place[36] pour l'amincissement servant à la révélation de vias se déroule en deux étapes :

- Premièrement, l'arrière du wafer est aminci par abrasion mécanique jusqu'à quelques μm au-dessus des vias. Il reste, dans cet exemple, $7\ \mu\text{m}$ de silicium au-dessus des vias. Cette étape ne révèle donc pas encore les vias, mais permet un amincissement grossier et rapide. Sur la figure 2.14, on note une variation d'épaisseur de $2\ \mu\text{m}$ avec ce procédé, bien que le substrat diffère de celui des cellules triples jonctions (silicium vs germanium), les résultats obtenus dans cet article pourront être relativement comparables avec nos travaux. Il sera quand même difficile d'interpréter la comparaison dans ce cas puisqu'ils ne font que mentionner la méthode d'amincissement utilisée sans autre précision. Cette méthode étant le grinding.

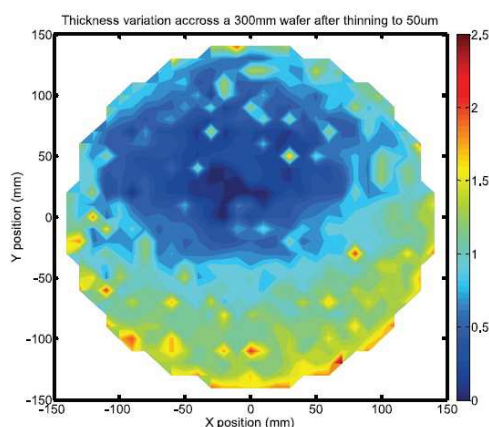


Figure 2.14 Variation d'épaisseur d'un wafer 300mm après amincissement jusqu'à $50\ \mu\text{m}$ d'épaisseur restantes par abrasion mécanique[36]

- La deuxième étape consiste quant à elle à la révélation à proprement parler des vias, il faut donc utiliser un amincissement sélectif, pour ce faire on utilise une gravure sèche isotrope et sélective.

Il est à noter également que dans ce genre de procédé, le collage temporaire a une importance cruciale dans la qualité de l'amincissement[17]. En effet un collage avec une mauvaise planéité entraînera de fait un amincissement avec une mauvaise planéité. De plus si le collage engendre des bulles entre le germanium et le support porteur alors les risques de casse pendant l'amincissement sont élevés.

Des transistors en germanium

Les chercheurs en électronique se sont récemment de nouveau intéressés aux caractéristiques du germanium pour la fabrication de transistors CMOS[37]. Dans le cadre de la fabrication de ces transistors, le substrat en germanium doit être aminci.

Deux méthodes sont proposées, la première, qui consiste à un transfert de couche, n'est pas applicable dans le cadre de nos recherches puisqu'elle permet d'amincir le germanium d'une épaisseur inférieure à $1\mu\text{m}$. La deuxième s'exécute en deux étapes :

- **Amincissement mécanique abrasif** : permet d'enlever la matière pour obtenir l'épaisseur désirée
- **CMP (chemical-mechanical polishing)** : permet d'améliorer la qualité de surface du germanium

La figure 2.15 représente une mesure de rugosité du germanium aminci avec cette deuxième méthode.

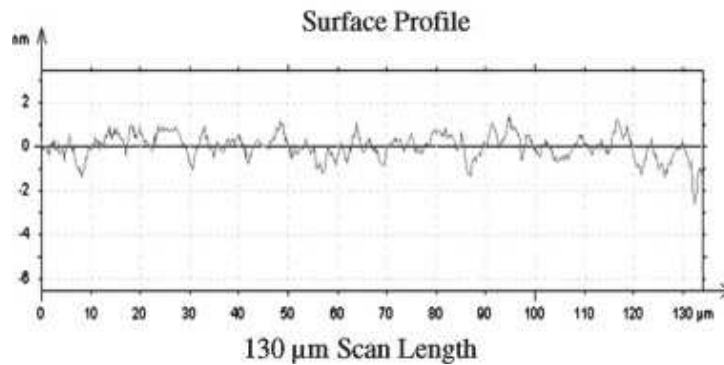


Figure 2.15 Mesure de profil par interférométrie de la surface polie[37]

Ce procédé, permet donc d'amincir le germanium de $500\mu\text{m}$ à $7\mu\text{m}$ avec une rugosité moyenne quadratique de $1,5\text{ nm}$ mesurée sur une surface de $250\mu\text{m}^2$.

L'optimisation de ce processus d'amincissement de substrat en germanium en deux étapes est bien connue[35]. Ce procédé permet d'obtenir un substrat mince avec une qualité de surface élevée (Rugosité moyenne arithmétique inférieure à 2 nm).

2.3 Problématique, question de recherche et objectifs

Comme nous l'avons vu, plusieurs difficultés entrent en jeu lorsque l'on cherche à amincir une cellule triple jonctions : le taux de recombinaison, le maintien mécanique, l'homogénéité de surface, le contrôle de l'épaisseur, la durée d'amincissement, la rugosité, la répétabilité... sont autant de paramètres à prendre en compte pour obtenir un processus

d'amincissement viable. Amincir des cellules photovoltaïques triple-jonctions permettra d'envisager d'améliorer les domaines d'application des cellules à haut rendement, notamment en facilitant le refroidissement (CPV) et en réduisant l'encombrement (spatial). Durant ces travaux nous avons donc cherché à répondre aux questions de recherche suivantes :

Est-il envisageable d'intégrer une étape d'amincissement, notamment abrasif, dans le processus de fabrication de cellules photovoltaïques multi-jonctions ?

Comment se comporte l'efficacité des cellules triple-jonctions en fonction de leur épaisseur ?

L'objectif est donc de concevoir un procédé permettant de réduire d'environ $140\text{ }\mu\text{m}$ l'épaisseur du substrat en germanium de l'architecture classique d'une cellule photovoltaïque triple jonction, tout en veillant à ne pas dégrader son efficacité. Le processus doit permettre d'obtenir une surface plane avec une rugosité minimale. Le maintien physique étant assuré par les collages tels que mis en place par Clément Colin et Clément Laucher. Il sera investigué la solution d'amincissement mécanique abrasif et il s'agira de mettre en place un protocole de caractérisation de l'amincissement déterminant ainsi les capacités et les limites d'un usinage abrasif appliqué aux cellules photovoltaïques triple-jonctions. Cela devra nous permettre de concevoir un procédé complet de fabrication de cellules photovoltaïques amincies. Nous pourrions, par la suite, étudier la tenue thermique et les performances d'une cellule amincie sous concentration, l'objectif étant de démontrer l'intérêt des cellules minces en vue d'appliquer des méthodes de séparation de substrat comme l'épitaxial lift-off, le spalling contrôlé ou encore le Germanium poreux afin de bénéficier du recyclage du substrat excédentaire.

A la suite de notre étude, nous avons réussi à mettre en place un amincissement par meulage de substrat de Germanium de petite dimensions (1cm^2). Nous avons mis en évidence l'apparition de fissuration sur la structure III-V/Ge que nous avons réussi à contrôler en faisant varier, la vitesse d'amincissement, la quantité amincie et l'épaisseur du collage sur le support temporaire. Nous avons pu éliminer l'apparition des ces fissurations sur un empilement III-V/Ge vierge (c-à-d sans autres étapes de fabrication) pour un procédé amincissant le substrat jusqu'à $20\text{ }\mu\text{m}$ avec une vitesse d'amincissement de $1\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ et une épaisseur de collage de $30\text{ }\mu\text{m}$. Cependant avec la fabrication complète de cellules photovoltaïques, le contrôle des fissurations a été plus délicate et on observe, pour les mêmes conditions que présenté précédemment, l'apparition de fissuration et ce même pour des épaisseurs de substrat allant jusqu'à $40\text{ }\mu\text{m}$.

CHAPITRE 3

Mise en fonctionnement et caractérisation d'un outil d'usinage par abrasion

L'objectif de ce projet est d'intégrer l'amincissement abrasif à la fabrication d'une cellule solaire triple jonction. Or l'instrument d'usinage par abrasion à disposition n'a jamais été utilisé au sein du 3IT. La première étape du projet, présentée dans ce chapitre, est la mise en fonctionnement et la caractérisation de l'outil. Nous étudierons l'amincissement sur des substrats tests en Silicium et caractériserons les défauts de surface engendrés par le procédé ainsi que son homogénéité. Nous verrons donc l'influence de la vitesse d'amincissement et de la rotation du plateau à gaufres sur l'amincissement. Pour finir nous usinerons une gaufre de Germanium qui constitue le substrat des cellules que nous voulons amincir.

3.1 Méthodologie de la caractérisation de l'amincissement

Pour pouvoir déterminer la qualité de la surface obtenue après amincissement, il faut définir des critères de qualité et une méthode de mesure. Les deux principaux critères que nous allons utiliser seront la rugosité et la variation totale d'épaisseur (TTV).

Rugosité : La définition de rugosité est régie par une norme : ISO 4287[38], les définitions qui suivent sont toutes issues de cette norme.

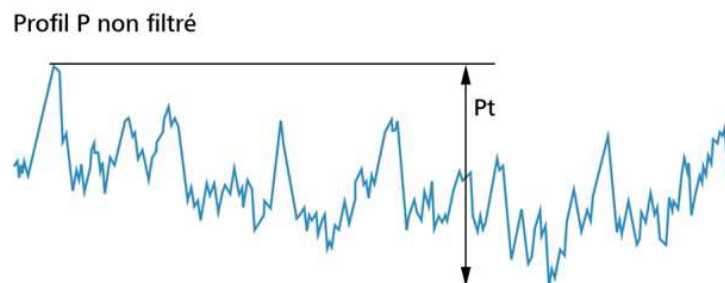


Figure 3.1 Profil brut d'une mesure de surface[39]

On note P le profil brut non filtré d'une mesure au profilomètre d'une surface (figure 3.1). A ce profil on applique deux filtres fréquentiels, passe-haut et passe-bas, afin d'obtenir le profil R de rugosité et le profil W d'ondulation (figure 3.2).

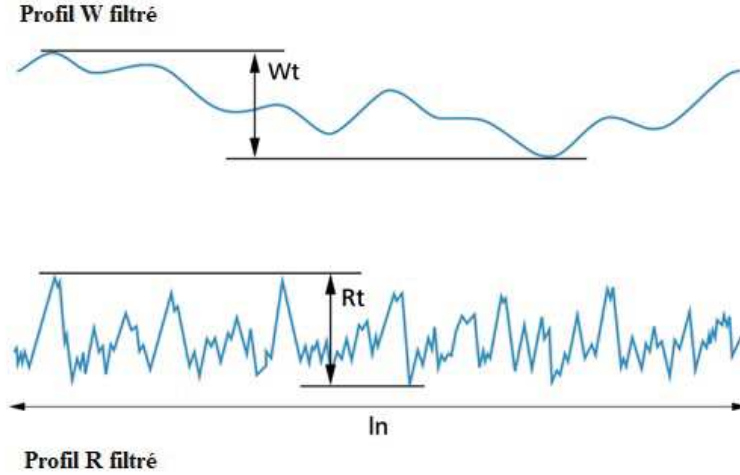


Figure 3.2 Profil R et W filtré d'une mesure de surface[39]

C'est donc sur le profil R que l'on fait des mesures de rugosité. On note Z_j la hauteur des mesures en chaque point, $\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (Z_j)$ la valeur moyenne du profil et $R_j = Z_j - \bar{Z}$ la différence à chaque point du profil avec la valeur moyenne, alors :

- **Rugosité arithmétique** $R_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (|R_j|)$
Moyenne arithmétique des écarts de hauteur à la valeur moyenne.
- **Rugosité quadratique** $R_q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (|R_j|^2)}$
Moyenne quadratique des écarts de hauteur à la valeur moyenne.
- **Rugosité pic à pic** $R_t = |\min R_j| + |\max R_j|$
Hauteur pic à pic maximale.

Les paramètres de rugosité R_a , R_q et R_t sont les trois paramètres les plus utilisés et ils peuvent se mesurer par profilométrie mécanique ou optique, par interférométrie ou par microscope à force atomique.

TTV : Total thickness variation, est la variation maximale d'épaisseur du wafer. On mesure généralement l'épaisseur du wafer à cinq endroits, sans trop se rapprocher des

bords. On peut également faire des mesures plus précises à l'aide de profilomètre optique ou mécanique.

Cependant, lorsque l'on amincit un wafer, celui-ci devient plus souple et est donc plus susceptible de se tordre sous l'effet de l'aspiration. Dans ce cas les méthodes classiques (trois points, quatre points, anneau) de maintien sous vide par pompage deviennent problématiques[40], car le pompage influence le profil mesuré. La méthode utilisée pour éviter ce problème consiste en l'utilisation de supports avec sillons afin de répartir la suction sur tout le wafer.

Afin de s'assurer de la pertinence de nos mesures au profilomètre il conviendra de vérifier l'épaisseur du wafer à différents endroits. Pour cela, on clivera les wafers en plusieurs tranches afin de vérifier leur épaisseur à l'aide d'un microscope optique et d'un microscope électronique. Dans la suite de ce chapitre, nous comparerons les profils d'épaisseur mesurés avec ces deux différents microscopes.

3.2 Caractérisation de l'amincissement par abrasion

Dans l'objectif d'appliquer l'abrasion mécanique à l'amincissement de cellules solaires triple jonctions nous avons caractérisé un instrument d'usinage par abrasion de type blanchard présent au 3IT.

Comme on peut le voir sur la figure 2.10, l'instrument se compose d'une tête rotative sur laquelle se trouve une meule abrasive. Sur cette meule sont liés, avec de la résine, des abrasifs de diamant. La tête rotative descend avec une vitesse définie sur un plateau tournant contenant les gaufres que l'on veut amincir. Dans le cadre de nos recherches nous avons utilisé : Precision Surface Grinding Machine, MPS 2 R400 DS fabriqué par G&N.



Figure 3.3 Image de l'instrument d'usinage par abrasion présent au 3IT.

Les deux principaux paramètres dont nous allons étudier l'influence sur la qualité finale de l'amincissement sont :

- La vitesse d'amincissement, définie par la vitesse à laquelle la tête abrasive (meule, figure 3.3) descend sur les gaufres. Cette valeur est directement entrée par l'utilisateur dans la machine en $\mu\text{m}/\text{min}$ (Downfeed)
- La vitesse de rotation du plateau à gaufres (figure 3.3), sur lequel les gaufres sont maintenues par succion. Cette vitesse dépend de la position d'un potentiomètre. La figure 3.4 montre la vitesse de rotation qui a été mesurée en fonction de la position du potentiomètre. Ainsi il sera possible de varier la vitesse entre 1 RPM et 20 RPM.

La vitesse de rotation de la meule quant à elle est fixée par le moteur du grinder et ne peut être changée.

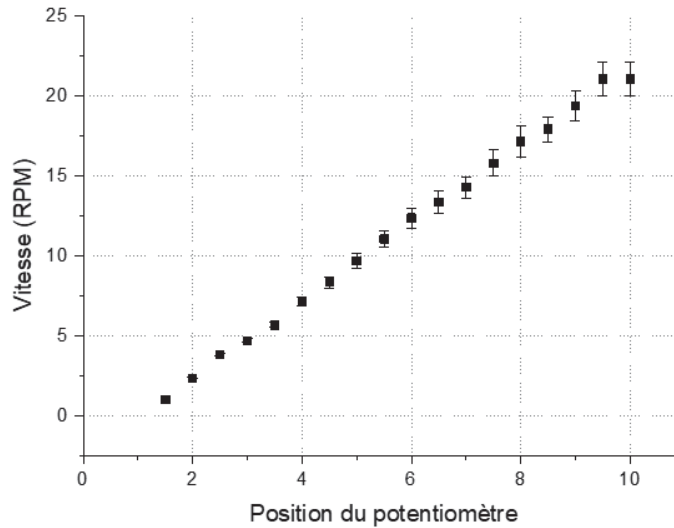


Figure 3.4 Calibration de la vitesse de rotation du plateau à gaufres.

Afin de caractériser la qualité de l'amincissement en fonction de la vitesse de rotation du plateau et de la vitesse d'amincissement, plusieurs tests d'amincissement vont être effectués. Nous allons tout d'abord nous intéresser à la rugosité du substrat, puis nous nous intéresserons au profil d'épaisseur qui nous donnera des informations sur l'homogénéité de l'amincissement. Le tableau 3.1 récapitule les différents procédés effectués pour la caractérisation de l'amincissement.

Nous étudierons deux cas distincts :

Le premier cas sont les faibles vitesses d'amincissement, permettant d'être moins agressif sur la surface, avec lesquelles nous amincirons moins de matériau. Le deuxième cas étant les hautes vitesses d'amincissement, nous amincirons avec celles-ci une plus grande quantité de matériau. Les hautes vitesses d'amincissement sont dédiées à amincir la majeure partie

Tableau 3.1 Plan expérimental pour la caractérisation de l'amincissement abrasif

numéro	vitesse d'amincissement	vitesse du plateau à gaufre	épaisseur amincie
1	1 $\mu\text{m}/\text{min}$	1 RPM	10 μm
2	1 $\mu\text{m}/\text{min}$	9.7 RPM	10 μm
3	1 $\mu\text{m}/\text{min}$	21.1 RPM	10 μm
4	5 $\mu\text{m}/\text{min}$	1 RPM	10 μm
5	5 $\mu\text{m}/\text{min}$	9.7 RPM	10 μm
6	5 $\mu\text{m}/\text{min}$	21.1 RPM	10 μm
7	20 $\mu\text{m}/\text{min}$	14.3 RPM	80 μm
8	20 $\mu\text{m}/\text{min}$	21.1 RPM	80 μm
9	30 $\mu\text{m}/\text{min}$	14.3 RPM	80 μm
10	30 $\mu\text{m}/\text{min}$	21.1 RPM	80 μm
11	50 $\mu\text{m}/\text{min}$	14.3 RPM	80 μm
12	50 $\mu\text{m}/\text{min}$	21.1 RPM	80 μm

du substrat pendant que les faibles vitesses seront utilisées pour finir moins agressivement les derniers micromètres restants.

Cette caractérisation a été menée sur des wafers en Silicium (orientation : 100, taille : 4", épaisseur : 525 μm + une couche d'épithaxie de Silicium de 13,5-16,5 μm). Le Silicium étant un matériau bien connu, souvent utilisé en micro-électronique et surtout pas cher, il nous servira de référence. Le numéro de grit de la tête de meulage utilisée dans la suite du chapitre est 800 correspondant à une taille des abrasifs variant entre 12 et 36 μm .

3.3 Caractérisation de la rugosité

Pour une première observation qualitative de la rugosité, comparons le résultat obtenu après amincissement avec les résultats obtenus dans l'industrie du wafer de Silicium.

La face non-polie d'un wafer de Silicium nous servira donc de référence, indiquant ce que l'industrie du wafer peut obtenir comme qualité de surface après amincissement et sans étape de polissage. La surface qui nous servira de référence aura donc subi 3 étapes différentes, une découpe à la scie, un meulage puis une attaque chimique. La figure 3.5(a) montre une image au microscope de la surface d'un substrat de silicium, et la figure 3.5(c) présente une mesure au profilomètre de sa surface sur 100 μm . La différence d'élévation entre les parties les plus hautes et les plus basses est de l'ordre de 300 nm. La figure 3.5(b) représente une image microscope du substrat Si après avoir été aminci à 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ avec une vitesse de plateau de 1 rpm, et la figure 3.5(d) une mesure au profilomètre de sa surface sur 100 μm également. Ici, on observe une différence d'élévation nettement plus

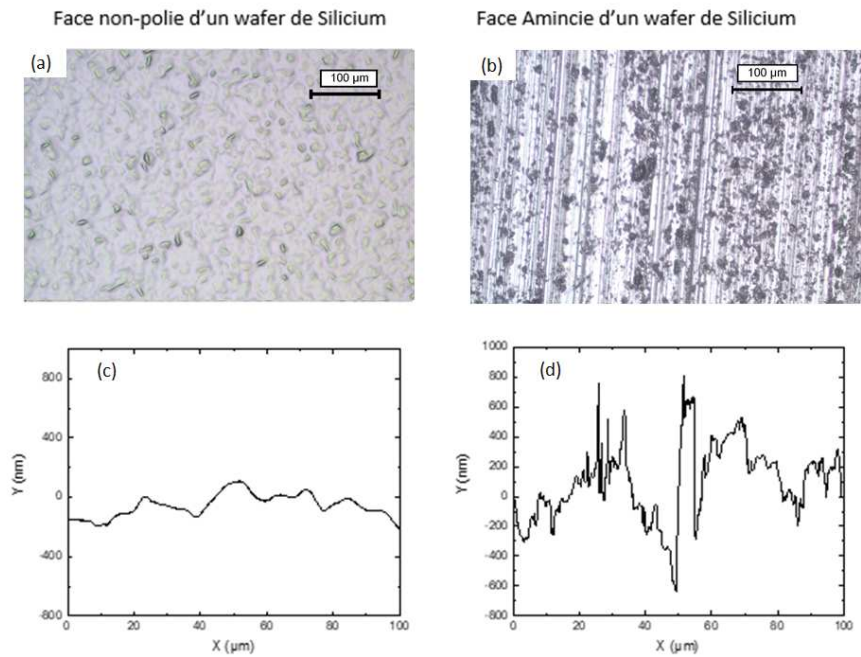


Figure 3.5 image et mesure de profilomètre prises sur (a)(c) une surface non amincie et (b)(d) une surface amincie.

importante, car elle est supérieure à $1 \mu\text{m}$, soit plus de trois fois supérieur à notre référence. De plus, la répartition des défauts est différente visuellement. Sur la surface référence on observe des défauts qui n'ont pas d'arrangement spécifique alors que sur la surface amincie les défauts suivent l'orientation de stries parallèles les unes aux autres, qui correspondent à la direction du frottement de la tête abrasive. On observe également sur les mesures de profil que la surface amincie possède une plus grande fréquence de défauts, en effet son profil de rugosité est moins lisse que celui de la surface référence.

Afin de mieux caractériser ces défauts, nous avons effectué des observations au microscope électronique à balayage de la surface amincie :

La figure 3.6 présente l'image MEB de la surface d'un échantillon aminci à $1 \mu\text{m}/\text{min}$ avec une vitesse de plateau de 1 rpm. Les défauts et marques visibles sur l'image illustrent le processus mis en jeu durant l'amincissement abrasif, c'est-à-dire que les grains abrasifs procèdent par micro-enlèvement de matière. Comme nous nous y attendions, ce procédé d'amincissement est destructeur pour la surface. Nous savons donc que nous avons une surface avec beaucoup de défauts après usinage. Pour quantifier ces défauts nous allons mesurer la rugosité de surface.

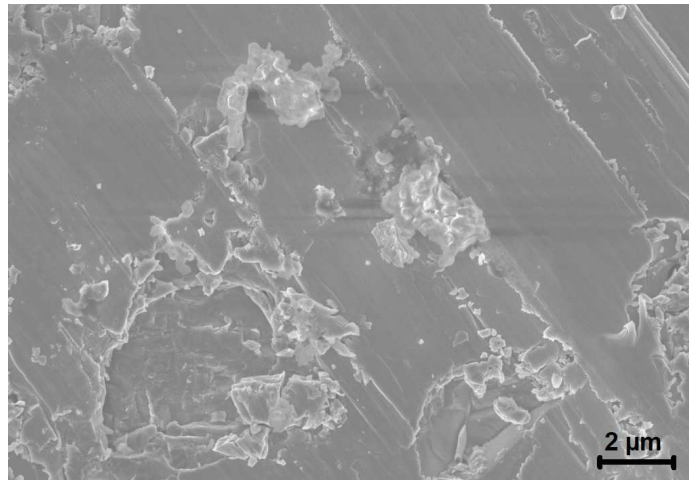


Figure 3.6 Observation au MEB d'une surface amincie à $1 \mu\text{m}/\text{min}$ avec une vitesse de plateau de 1 rpm.

Nous nous intéresserons à deux types de rugosité, la rugosité arithmétique R_a qui représente la variation absolue du profil par rapport à sa valeur moyenne ainsi que la rugosité pic-à-pic R_t qui se définit comme la distance entre le plus grand pic et la plus grande vallée (figure 3.7).

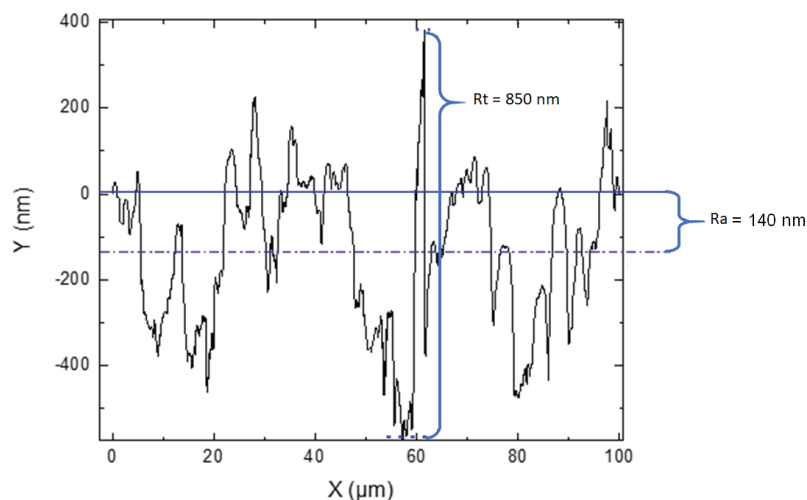


Figure 3.7 Définition de la rugosité R_a et R_t .

La mesure de rugosité s'effectue au profilomètre mécanique sur une longueur de $100 \mu\text{m}$ avec un stylet de rayon $2.5 \mu\text{m}$. L'amincissement a lieu sur la face polie de la gaufre afin de considérer négligeable la rugosité présente avant l'amincissement pour ainsi n'étudier que la rugosité engendrée par l'usinage. La rugosité sera mesurée en cinq points de la gaufre. La longueur de mesure est très faible devant la taille d'une gaufre, tel que l'on peut considérer négligeable les variations du profil autre que la rugosité tel que la courbure ou l'ondulation

de la gaufre. Par conséquent la rugosité indiquée par la suite est mesurée directement sur le profil brut sans application de filtres passe-haut.

Vérifions l'influence de la vitesse d'amincissement sur la rugosité arithmétique :

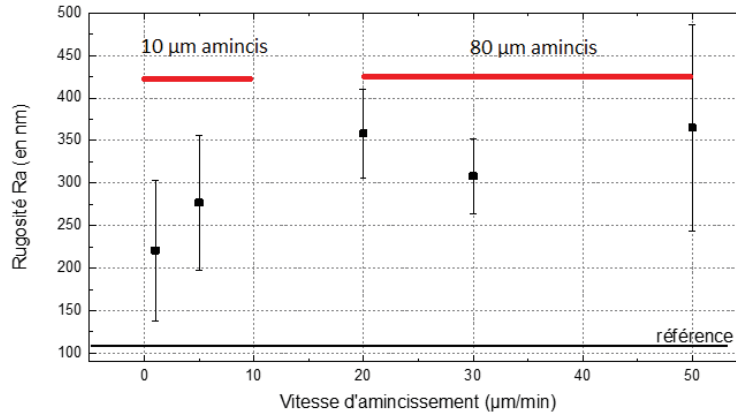


Figure 3.8 Rugosité Ra en fonction de la vitesse d'amincissement avec une vitesse de plateau fixé à 21.1 rpm.

La figure 3.8 représente la valeur moyenne et l'écart-type de la rugosité Ra mesurée sur 5 points différents de la gaufre (l'écart-type nous informe de la dispersion de la rugosité le long de la gaufre) pour des vitesses d'amincissement variant de 1 $\mu\text{m}/\text{mn}$ à 50 $\mu\text{m}/\text{mn}$ (quantité amincie pour 1 et 5 $\mu\text{m}/\text{mn}$ = 10 μm , pour 20, 30 et 50 $\mu\text{m}/\text{mn}$ = 80 μm) et pour une vitesse de rotation du plateau à gaufres constante égale à 21.1 RPM. On remarque que quelle que soit la vitesse d'amincissement choisie, la rugosité finale obtenue reste toujours significativement supérieure à la rugosité de la référence qui est de 109 nm (rugosité mesurée sur la face non-polie d'un wafer de la même boîte que celui aminci, nous permettant ainsi de comparer nos résultats avec ceux de l'industrie du Silicium). Plus la vitesse d'amincissement est importante, plus la rugosité est grande. Cette tendance semble être plus marqué pour les faibles vitesses d'amincissement, on note une plus grande différence entre 1 $\mu\text{m}/\text{min}$ et 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ ($\Delta\text{Ra} = 56$ nm) qu'entre 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ et 50 $\mu\text{m}/\text{min}$ ($\Delta\text{Ra} = 7$ nm). La rugosité obtenue à une vitesse d'amincissement de 30 $\mu\text{m}/\text{min}$ semble s'écarter légèrement de la tendance générale de la courbe en étant inférieur de 50 nm à la rugosité obtenue pour 20 $\mu\text{m}/\text{min}$.

Ainsi, nous pouvons choisir la vitesse d'amincissement afin de limiter la rugosité. Une vitesse d'amincissement faible sera à privilégier et 30 $\mu\text{m}/\text{min}$ semble être un bon compromis entre vitesse d'amincissement et rugosité arithmétique. Cependant, ne connaissant pas l'influence de la rugosité de la face arrière sur les performances d'une cellule, il est difficile de définir une valeur de rugosité à cibler.

En faisant le même exercice avec la rugosité Rt (pic-à-pic), on s'attend à obtenir la même

tendance que Ra en fonction de la vitesse d'amincissement. Rt nous renseignera sur l'inégalité des morceaux de matière arrachés par les abrasifs.

La figure 3.9 représente la valeur moyenne et l'écart-type de la rugosité Rt mesurée sur 5 points différents de la gaufre pour des vitesses d'amincissement variant de $1 \mu\text{m}/\text{mn}$ à $50 \mu\text{m}/\text{mn}$ et pour une vitesse de rotation du plateau à gaufres constante, 21.1 RPM. On voit bien effectivement que la courbe est très similaire à celle obtenue pour la mesure de Ra. L'inégalité d'épaisseur amincie localement peut atteindre entre 1.6 et $2.1 \mu\text{m}$.

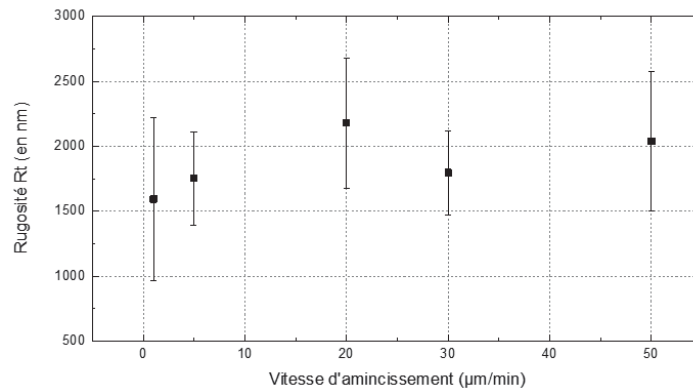


Figure 3.9 Rugosité Rt en fonction de la vitesse d'amincissement avec une vitesse de plateau fixé à 21.1 rpm.

En privilégiant les faibles vitesses d'amincissement on réduit globalement la rugosité en réduisant Ra et Rt, les défauts sont plus homogènes et la différence d'épaisseur engendrée par les défauts est moindre. Nous connaissons l'influence de la vitesse d'amincissement sur la rugosité, désormais étudions l'influence de la vitesse de rotation du plateau à gaufres :

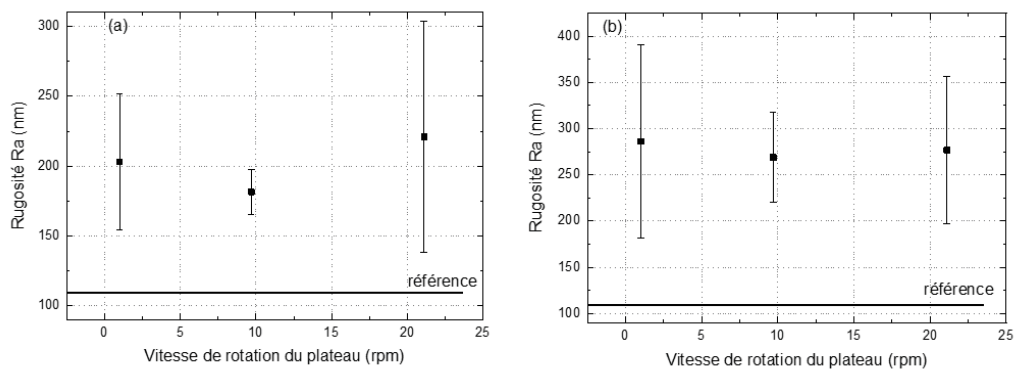


Figure 3.10 Rugosité Ra en fonction de la vitesse de rotation du plateau à gaufres, (a) vitesse d'amincissement fixée à $1 \mu\text{m}/\text{min}$, (b) vitesse d'amincissement fixée à $5 \mu\text{m}/\text{min}$.

Les figures 3.10(a) et 3.10(b) représentent la rugosité mesurée en fonction de la vitesse de rotation du plateau à gaufres pour deux vitesses d'amincissement données, respectivement $1\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ et $5\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$. On observe que la vitesse du plateau n'a pas d'influence significative sur la rugosité de la surface amincie, ainsi quelle que soit la vitesse choisie nous obtenons une rugosité Ra semblable. La rugosité ne sera pas un paramètre à prendre en compte pour le choix de la vitesse de rotation du plateau à gaufres. Ainsi, les mesures de rugosité nous ont permis de conclure que, si nous voulons minimiser la rugosité finale de la surface il nous faudra choisir la vitesse d'amincissement la plus faible possible. En outre, le choix de la vitesse du plateau à gaufres quant à lui n'a pas d'importance pour minimiser ce paramètre puisqu'il n'influence pas significativement la rugosité.

Pour finir on remarque que les écart-types mesurés sont relativement élevés (avec un minimum notable pour un amincissement à $30\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ et pour une vitesse de rotation du plateau à gaufre à 10 RPM). Cela montre que ce type d'amincissement ne permet pas un bon contrôle de la rugosité. La qualité de surface varie beaucoup sur une même gaufre amincie. Ces résultats sur l'écart-type sont tout de même à nuancer à cause de la méthode de mesure au profilomètre mécanique (mesure très courte et en 1D). Pour pouvoir conclure sur l'écart-type de la rugosité, il faudrait pouvoir mesurer la rugosité en 2D sur toute la surface de la gaufre, ce qui n'a pas été fait durant cette maîtrise faute de matériel.

3.4 Caractérisation du profil d'épaisseur

La rugosité n'est pas le seul paramètre à étudier pour s'assurer de la qualité d'un amincissement, nous devons aussi nous assurer de l'homogénéité du procédé le long du wafer et pour faire cela nous allons vérifier le profil d'épaisseur du wafer en nous attardant notamment sur la TTV (Total thickness variation), qui représente la variation maximale de l'épaisseur, et sur l'écart-type des épaisseurs, qui représente l'écart moyen à la valeur moyenne de l'épaisseur du wafer.

Méthode de mesure, illustrée figure 3.11 :

Les wafers seront clivés tous les centimètres afin de pouvoir mesurer l'épaisseur de chaque tranche, les mesures seront effectuées tous les centimètres sur ces tranches et répétées six fois pour obtenir une incertitude statistique. Cette méthode étant destructive, nous ne pourrons pas étudier le profil d'épaisseur avant et après l'amincissement. Nous choisirons alors deux gaufres références auxquels nous pourrons comparer nos résultats. La mesure de l'épaisseur faite sur la clive peut être faite au microscope électronique ou au microscope optique, comparons les deux méthodes de mesure.

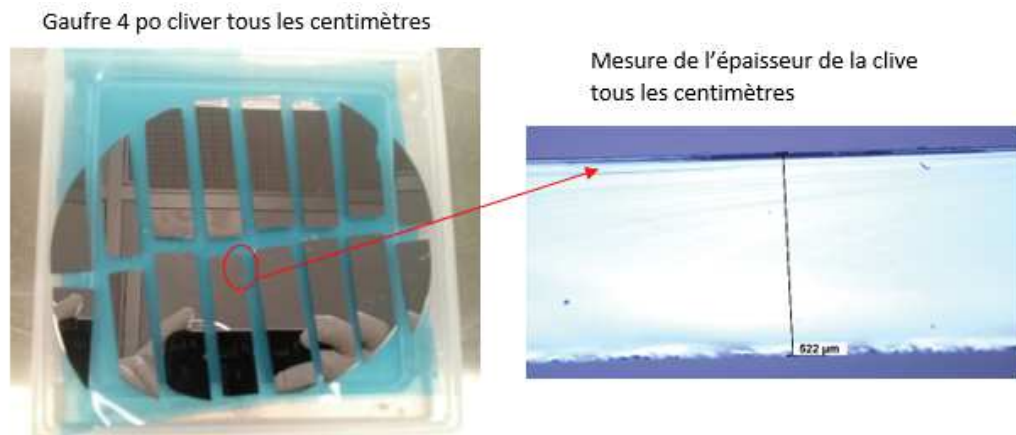


Figure 3.11 Illustration de la méthode de mesure du profil d'épaisseur.

La figure 3.12 représente le profil d'épaisseur d'une gaufre référence en Si de 100 mm de diamètre. (a) représente le profil obtenu avec des mesures faites au microscope électronique et (b) avec des mesures faites au microscope optique. Pour les deux techniques, les mesures d'épaisseur moyenne, écart type et TTV sont reportées et comparées dans le tableau 3.2.

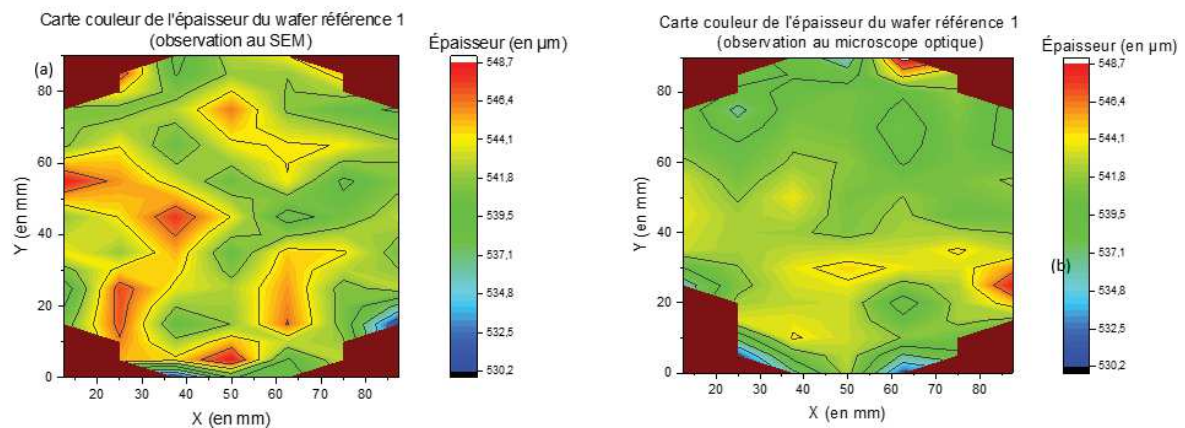


Figure 3.12 profil d'épaisseur du wafer référence 1, (a) obtenu par mesure au microscope électronique, (b) par mesure au microscope optique.

Tableau 3.2 épaisseur moyenne et écart-type obtenus avec deux différentes méthodes de mesure

	électronique	optique
épaisseur moyenne	542.5 μm	541.25 μm
écart-type	2.9 μm	2.5 μm

On voit que les deux méthodes de mesure sont équivalentes car l'on obtient des valeurs d'épaisseur très proches avec les deux instruments de mesure. Les mesures au microscope optique étant plus simples à réaliser nous allons pour la suite des mesures utiliser cet

instrument. Nous allons comparer les profils d'épaisseurs obtenus après amincissement avec les profils de deux gaufres non-amincis qui serviront de référence.

La figure 3.13 représente le profil d'épaisseur de deux gaufres référence en Si de 100 mm qui serviront de point de comparaisons pour les gaufres amincies.

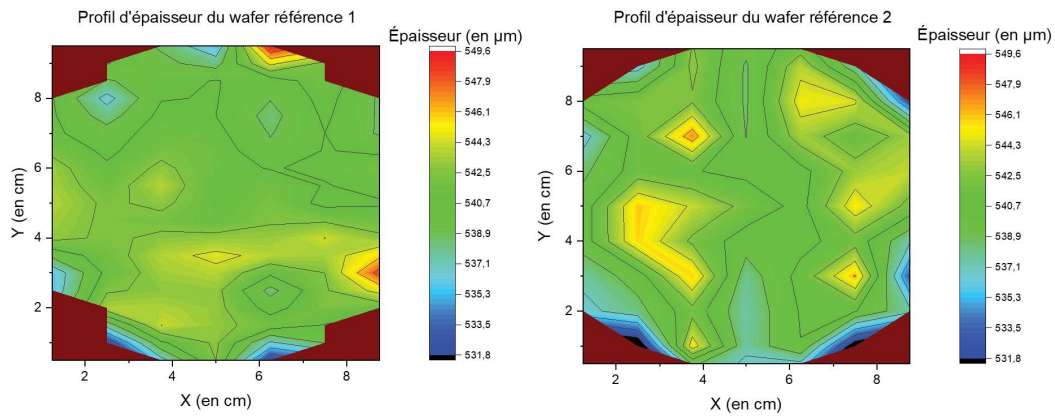


Figure 3.13 profil d'épaisseur mesuré au microscopre optique (a) du wafer référence 1 et (b) du wafer référence 2.

Tableau 3.3 Épaisseur moyenne, écart-type et TTV obtenues pour deux gaufres de références

	référence 1	référence 2
écart-type	2.5 μm	3.6 μm
TTV	17.9 $\pm 5.5 \mu\text{m}$	17.4 $\pm 1.9 \mu\text{m}$

Les deux profils semblent très similaires et on ne distingue pas particulièrement une forme de profil se dégager de la carte de couleur (comme par exemple une pente). Sur le tableau 3.3, les valeurs de dispersion des épaisseurs (écart-type) et de variation maximale d'épaisseur (TTV) sont indiquées à titre de référence. Ces données ont été mesurées sur des gaufres non-amincies d'après la méthode présentée figure 3.11.

3.4.1 Wafers amincis à 5 $\mu\text{m}/\text{min}$:

Des mesures de profils à une vitesse d'amincissement de 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ à trois différentes vitesses de rotation du plateau à gaufres ont été effectuées. 10 μm de Silicium ont été aminci. La figure 3.14 représente les profils d'épaisseur obtenus.

On ne remarque pas de profil particulier après amincissement à 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ et ce à n'importe quelle vitesse de rotation du plateau.

Les cartes de couleur ressemblent à celles obtenues pour les wafers références, cela semble

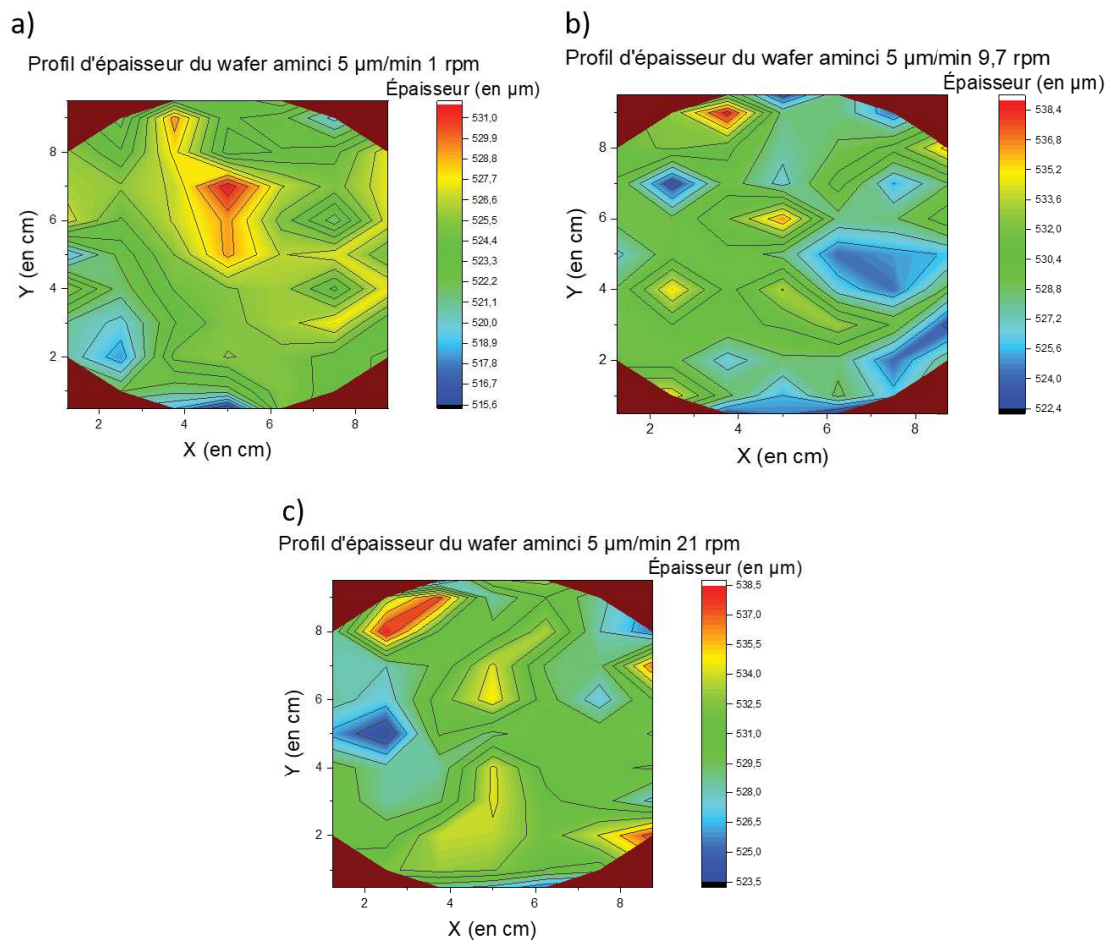


Figure 3.14 Profil d'épaisseur des wafer amincis à 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ et à une vitesse de plateau de a) 1 RPM, b) 9.7 RPM, c) 21 RPM.

Tableau 3.4 Épaisseur moyenne, écart-type et TTV obtenues pour des gaufres amincies à 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ à différente vitesse de rotation du plateau à gaufres.

	1 rpm	9.7 rpm	21.1 rpm
écart-type	2.9 μm	3.29 μm	3 μm
TTV	16.1 \pm 7.9 μm	16.6 \pm 4.2 μm	15 \pm 4.3 μm

indiquer que l'on conserve un profil d'épaisseur semblable à ce qu'il était avant le procédé. Nous avons donc plusieurs données de TTV et d'écart-type d'épaisseur pour une même vitesse d'amincissement mais à des vitesses de rotation du plateau différentes. Traçons les graphiques de la TTV et de l'écart-type en fonction de la vitesse de rotation du plateau.

La Figure 3.15 représente la variation totale d'épaisseur (TTV) des profils d'épaisseur des gaufres amincies à 5 $\mu\text{m}/\text{min}$ pour différentes vitesses de rotation du plateau à gaufres. La valeur référence correspond à la valeur (TTV) de la gaufre référence 1 précédemment

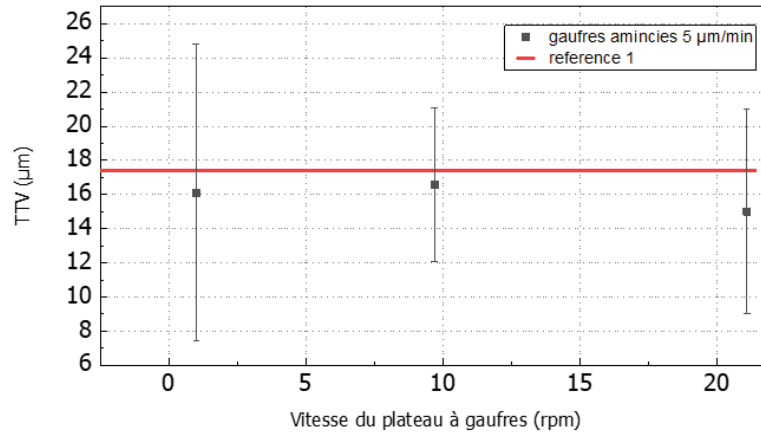


Figure 3.15 Total thickness variation (TTV) en fonction de la vitesse de rotation du support (vitesse d'amincissement : $5 \mu\text{m}/\text{min}$, quantité amincie : $10 \mu\text{m}$).

introduite. Les valeurs des gaufres amincies sont toujours équivalentes à la valeur de la gaufre référence.

La Figure 3.16 représente l'écart-type des profils d'épaisseur des gaufres amincies à $5 \mu\text{m}/\text{min}$ pour différentes vitesses de rotation du plateau à gaufres. Les valeurs références correspondent aux valeurs des gaufres référence 1 et 2 précédemment introduites. Les valeurs des gaufres amincies sont toujours comprises entre les valeurs des deux gaufres références. On observe très clairement que la TTV et l'écart-type obtenus sont équivalentes à ceux mesurés sur les wafers références et ne varient pas significativement en fonction de la vitesse de rotation du plateau à wafers.

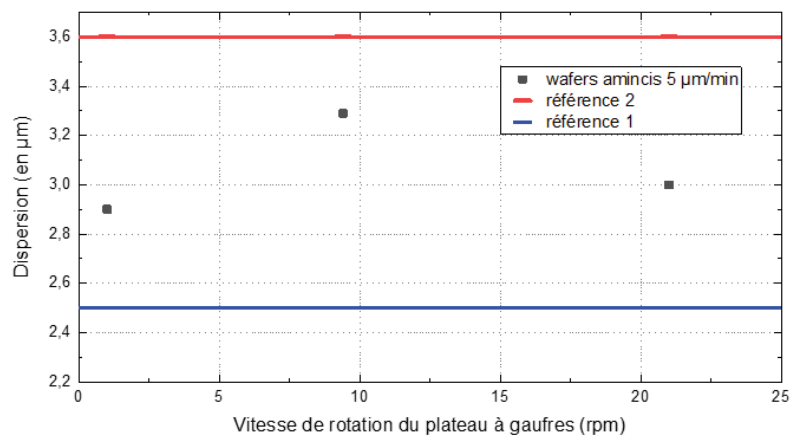


Figure 3.16 Écart-type en fonction de la vitesse de rotation du support (vitesse d'amincissement : $5 \mu\text{m}/\text{min}$, quantité amincie : $10 \mu\text{m}$).

3.4.2 Wafers amincis à 20, 30 et 50 $\mu\text{m}/\text{min}$

Étudions maintenant comment évolue le profil d'épaisseur lorsque l'on augmente la vitesse d'amincissement ainsi que la quantité de matériau enlevée. Nous allons amincir à des vitesses de 20, 30 et 50 $\mu\text{m}/\text{min}$ avec, pour chaque vitesse, deux vitesses de rotation différentes, 14.3 rpm et 21.1 rpm. La quantité de Silicium amincie sera de 80 μm . Les valeurs de l'écart-type et de la TTV des épaisseurs pourront être comparés.

Sur la figure 3.17 on peut observer les profils d'épaisseur de deux gaufres amincies à 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ avec deux vitesses de rotation du plateau à gaufres différentes, le tableau 3.5 répertorie leur écart-type et TTV.

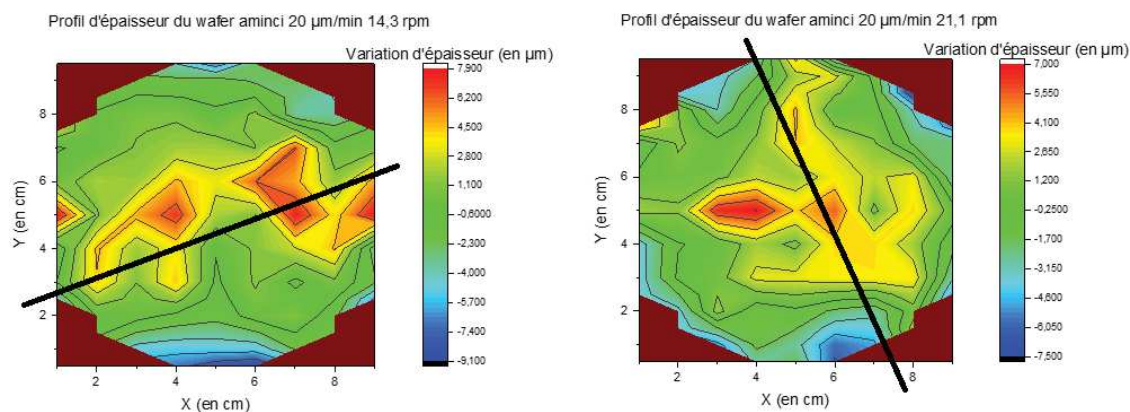


Figure 3.17 Profil d'épaisseur des wafers amincis à 20 $\mu\text{m}/\text{min}$.

Tableau 3.5 Épaisseur moyenne, écart-type et TTV obtenues pour des gaufres amincies à 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ à différente vitesse de rotation du plateau à gaufres.

	14.3 rpm	21.1 rpm
écart-type	3.3 μm	3 μm
TTV	17 $\pm 6.5 \mu\text{m}$	14.5 $\pm 3.9 \mu\text{m}$

Sur la figure 3.18 on peut observer les profils d'épaisseur de deux gaufres amincies à 30 $\mu\text{m}/\text{min}$ avec deux vitesses de rotation du plateau à gaufres différentes, le tableau 3.6 répertorie leur écart-type et TTV.

Tableau 3.6 Épaisseur moyenne, écart-type et TTV obtenues pour des gaufres amincies à 30 $\mu\text{m}/\text{min}$ à différente vitesse de rotation du plateau à gaufres.

	14.3 rpm	21.1 rpm
écart-type	2.4 μm	2.4 μm
TTV	13.4 $\pm 3.1 \mu\text{m}$	12.3 $\pm 2.4 \mu\text{m}$

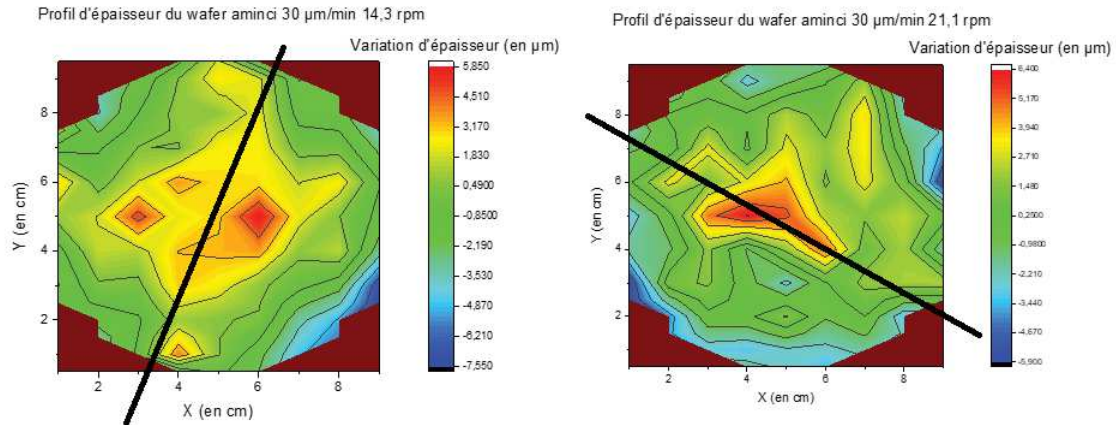


Figure 3.18 Profil d'épaisseur des wafers amincis à 30 $\mu\text{m}/\text{min}$.

Sur la figure 3.19 on peut observer les profils d'épaisseur de deux gaufres amincies à 50 $\mu\text{m}/\text{min}$ avec deux vitesses de rotation du plateau à gaufres différentes, le tableau 3.7 répertorie leur écart-type et TTV.

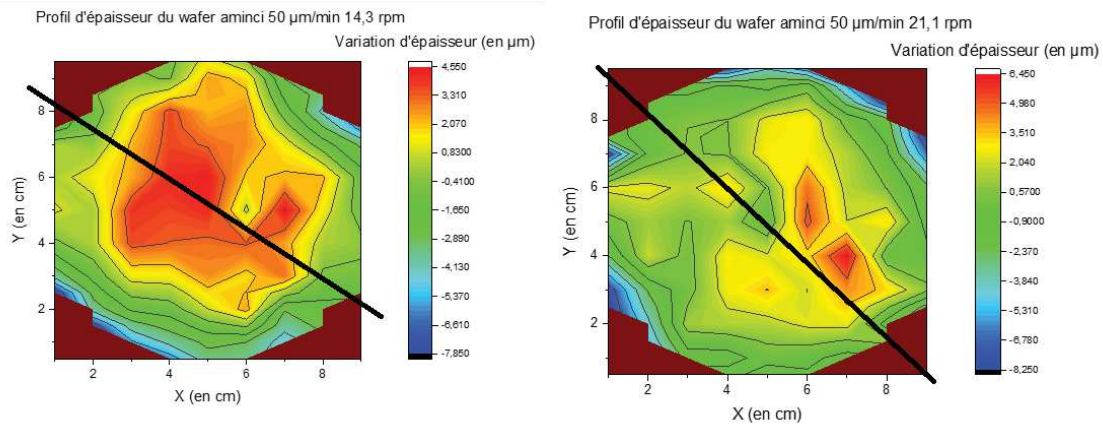


Figure 3.19 Profil d'épaisseur des wafers amincis à 50 $\mu\text{m}/\text{min}$.

Tableau 3.7 Épaisseur moyenne, écart-type et TTV obtenues pour des gaufres amincies à 50 $\mu\text{m}/\text{min}$ à différente vitesse de rotation du plateau à gaufres.

	14.3 rpm	21.1 rpm
écart-type	2.7 μm	3 μm
TTV	12.4 \pm 4.25 μm	14.7 \pm 1.9 μm

Ce que l'on remarque sur les cartes de couleurs des wafers amincis à 20, 30 et 50 $\mu\text{m}/\text{min}$, c'est qu'un type particulier de profil se dégage (particulièrement pour la vitesse d'amin-cissement de 20 $\mu\text{m}/\text{min}$). Si l'on regarde plus précisément les couleurs rouges et jaunes représentant les plus hautes épaisseurs, on peut remarquer une ligne traversant la gaufre

de part en part et passant environ par son centre. Cette ligne a été moins amincie que le reste de la gaufre (représentée avec une ligne noire sur les images). Ce résultat était attendu : La longueur de contact entre la meule d'amincissement et les wafers n'est pas constante alors que la force appliquée reste quant à elle constante pendant la durée du procédé. Par conséquent, la pression exercée sur les wafers n'est pas la même tout au long de l'amincissement. Sur la figure 3.20 on observe la variation totale d'épaisseur (TTV) d'une gaufre de 100 mm amincie à différentes vitesses, la valeur référence correspond à la TTV mesurée sur la gaufre référence 1. On remarque que la TTV des gaufres amincies est toujours inférieure à celle de la gaufre référence. Cet effet est plus significatif pour les hautes vitesses d'amincissement. Encore une fois la valeur obtenue pour la gaufre amincie à $30 \mu\text{m}/\text{min}$ semble sensiblement plus faible que les autres.

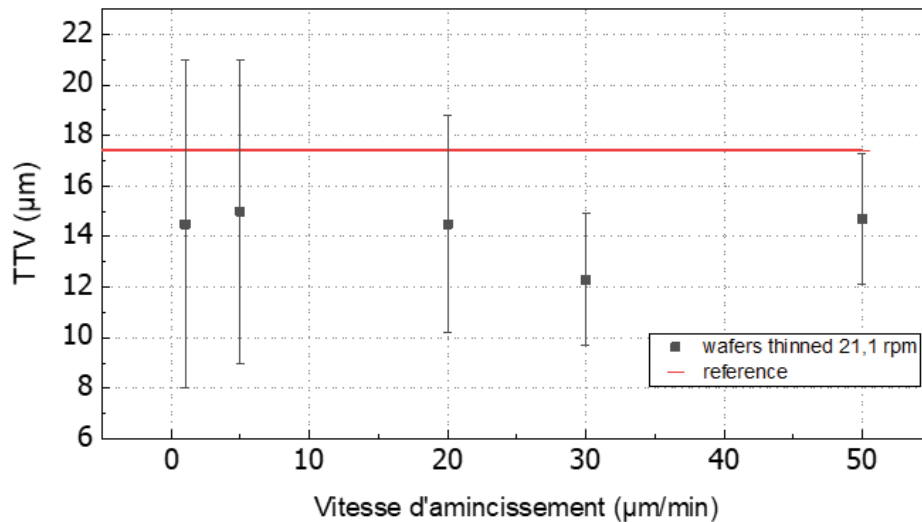


Figure 3.20 Total thickness variation (TTV) en fonction de la vitesse d'amincissement.

La figure 3.21 représente les différentes valeurs d'écart-type obtenues sur les profils d'épaisseur de gaufres amincis à des vitesses différentes, les valeurs références correspondent aux valeurs mesurées sur les deux gaufres références.

Toutes les valeurs mesurées sur les gaufres amincis se trouvent entre les valeurs de gaufres références, excepté pour la gaufre amincie à $30 \mu\text{m}/\text{min}$.

On s'aperçoit que le procédé d'amincissement a tendance à améliorer la TTV de la gaufre pendant que l'écart-type reste équivalent. On note tout de même que pour les vitesses de $1 \mu\text{m}/\text{min}$ et $5 \mu\text{m}/\text{min}$ seulement $10 \mu\text{m}$ ont été amincis, cela n'est probablement pas une épaisseur suffisante pour changer significativement le profil d'épaisseur. Les wafers amincis aux vitesses plus élevées ont été amincis de $80 \mu\text{m}$. Il semblerait que la vitesse d'amincisse-

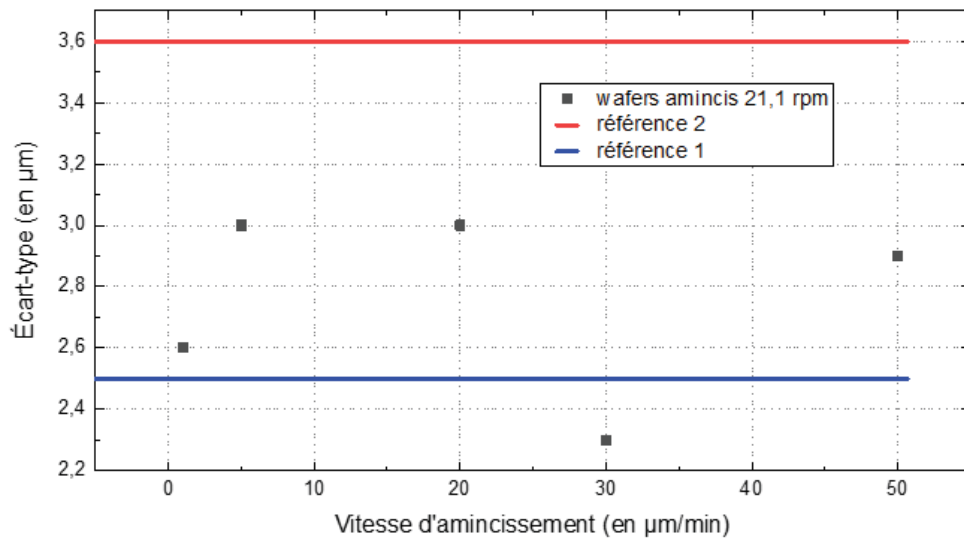


Figure 3.21 Écart-type en fonction de la vitesse d'amincissement.

ment de $30 \mu\text{m}/\text{min}$ soit une vitesse à privilégier puisque l'on obtient de meilleurs résultats pour tous les paramètres. La rugosité obtenue à cette vitesse est elle aussi relativement faible comparativement à $20 \mu\text{m}/\text{min}$ par exemple. En revanche, pour pouvoir conclure définitivement sur l'efficacité de l'amincissement à $30 \mu\text{m}/\text{min}$, il faudrait valider les observations faites ici en reproduisant plusieurs fois les mesures (ce que nous n'avons pas fait par manque de temps).

Il sera probable que lors de l'amincissement de matériau plus fragile que le Silicium, la vitesse de rotation du plateau à wafers ait une plus grande importance. Le risque étant la dégradation du matériau avec une vitesse de rotation trop élevée.

3.4.3 Bilan de la caractérisation

On a pu voir que la vitesse de rotation du plateau à gaufres n'avait aucune influence significative sur la rugosité et sur le profil d'épaisseur. En revanche on sait que la vitesse d'amincissement joue un rôle important sur la rugosité de surface obtenue après usinage, en effet plus cette vitesse d'amincissement est élevée plus la rugosité obtenue est élevée également. Il convient donc de minimiser au maximum la vitesse d'amincissement. On sait aussi que, amincir suffisamment de matériau à des vitesses élevées permet obtenir un profil d'épaisseur spécifique au procédé d'amincissement de type blanchard avec une TTV d'environ $14 \mu\text{m}$ sur silicium. On a pu également remarquer que la vitesse d'amincissement de $30 \mu\text{m}/\text{min}$ correspond au meilleur compromis vitesse d'amincissement/qualité de surface.

Le tableau 3.8 montre les principaux résultats obtenus avec la caractérisation des gaufres 4po de Silicium, les résultats sont comparés avec la référence qui est une gaufre non amincie et dont la rugosité a été mesuré sur sa face non polie. La colonne « différence avec la référence » correspond à une augmentation ou une diminution de la valeur mesurée en pourcentage, une valeur négative indique que le paramètre caractérisé est plus faible que la référence et une valeur positive indique que le paramètre est plus élevé que la référence.

On s'aperçoit donc globalement, qu'avec notre procédé, on aggrave grandement la rugosité de surface mais on améliore l'uniformité d'épaisseur de la gaufre.

Nous avons donc caractérisé les principaux paramètres de notre machine à usinage par abrasion. La suite sera d'introduire une étape d'amincissement à la fabrication d'une cellule photovoltaïque en s'appuyant sur les résultats de la caractérisation obtenus dans ce chapitre. Par conséquent, nous allons amincir une gaufre 4po de Germanium composant du substrat de nos cellules à amincir. Cela nous permettra de comprendre le comportement du matériau à l'usinage par abrasion et le comparer au Silicium.

Tableau 3.8 Bilan des différentes caractérisations.

	TTV (μm)	Rugosité R_a (nm)
Référence 1	17.9	109

Vitesse Amincissement	Vitesse Rotation	TTV (μm)	Différence avec la référence	R_a (μm)	Différence avec la référence	Épaisseur amincie (μm)
1 $\mu\text{m}/\text{min}$	1			202.87	+86%	10
	9.7			181.43	+66%	10
	21.1	14.5	-19%	220.82	+103%	10
5 $\mu\text{m}/\text{min}$	1	16.1	-10%	286.2	+163%	10
	9.7	16.6	-7.3%	268.8	+147%	10
	21.1	15	-16.2%	276.8	+152%	10
20 $\mu\text{m}/\text{min}$	14.3	17	-5%	338	+210%	80
	21.1	14.5	-19%	358.1	+228%	80
30 $\mu\text{m}/\text{min}$	14.3	13.4	-25.1%	296.9	+172%	80
	21.1	12.3	-31.3%	308.2	+183%	80
50 $\mu\text{m}/\text{min}$	14.3	12.4	-30.7%	361.7	+232%	80
	21.1	14.7	-17.9%	364	+233%	80

3.5 Application de l'amincissement abrasif à un substrat de Germanium

Dans le cadre de l'application de l'amincissement abrasif à une cellule triple-jonction, nous allons amincir une gaufre de Germanium 4po vierge, sans épitaxie. Nous avons préalablement enlevé la couche de nitrure sur la face arrière de la gaufre qui a une épaisseur initiale de $165\text{ }\mu\text{m}$. Nous avons choisi des conditions d'amincissement déjà étudiées précédemment qui avaient donné de bons résultats avec des gaufres de Silicium, soit une vitesse d'amincissement de $30\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ et une vitesse de rotation du plateau de 14 rpm. La gaufre a été amincie de $165\text{ }\mu\text{m}$ à $125\text{ }\mu\text{m}$ et s'est brisée. (amincissement arrêté dès la première brisure visible).

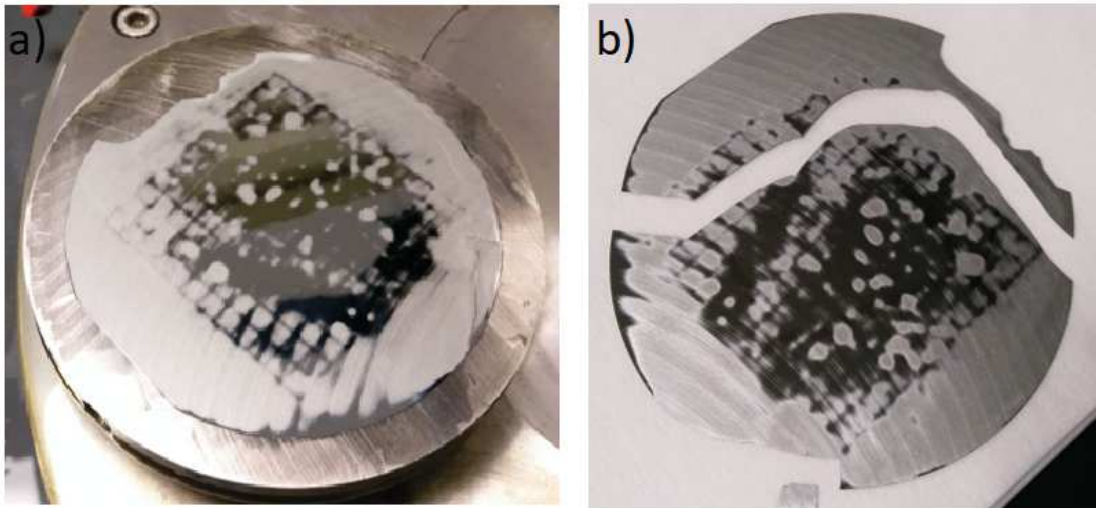


Figure 3.22 Photos d'une gaufre de Germanium amincie a) sur le support à wafers avec le vide, b) sortie de la machine d'amincissement.

On voit sur la figure 3.22, deux photos de la gaufre amincie, la deuxième photo b) a été prise une fois la gaufre retirée de son support. La photo a) a été prise directement après l'amincissement avec le vide maintenant toujours la gaufre sur son support. On remarque sur les deux photos que certaines zones de la gaufre ont été amincies alors que d'autres gardent leur aspect poli indiquant qu'elles n'ont pas été usinées par les abrasifs. Une forme de cadrillage est apparue sur la gaufre après amincissement et cela correspond au sillon permettant le vide entre le support et la gaufre. Nous en déduisons que la gaufre est déjà trop mince et trop souple pour être amincie sur l'instrument. Par conséquent, elle s'est brisée pendant l'amincissement comme on peut le voir sur la la figure 3.22 a). De plus comme la gaufre fût fragilisée, nous l'avons encore un peu plus endommagée en la retirant de l'aspiration, figure 3.22 b).

Les photos présentées en figure 3.23 permettent de comparer visuellement les surfaces amincies de Germanium et de Silicium avec les mêmes conditions, à savoir $30\text{ }\mu\text{m/min}$ de vitesse d'amincissement et 14 rpm de vitesse de rotation du support. On remarque toujours la même disposition de défauts, c'est-à-dire le long des stries qui correspondent à la direction de déplacement des abrasifs durant l'usinage.

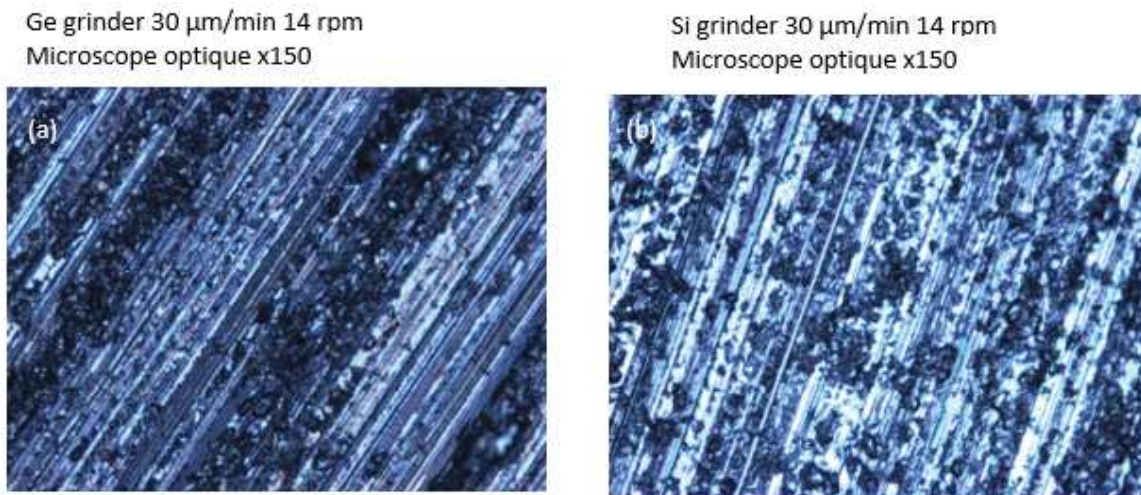


Figure 3.23 Comparaison entre une surface amincie (a) de Germanium et (b) de Silicium.

Comme il n'est pas possible d'amincir une gaufre de germanium de $165\text{ }\mu\text{m}$ avec notre instrument et que le développement de la fabrication de cellules sur gaufre de 4 po ne fait pas partie de notre objectif, nous allons nous intéresser principalement à la fabrication de petits échantillons et délaisser l'amincissement de gaufres complètes.

CHAPITRE 4

Amincissement d'une cellule photovoltaïque

4.1 Protocole de fabrication d'une cellule triple jonction amincie.

Nous avons précédemment étudié les différents paramètres de l'instrument d'amincissement et ainsi permis de le rendre disponible aux utilisateurs du 3IT. Désormais voyons comment l'intégrer à la procédure de fabrication d'une cellule triple jonction III-V/Ge. A partir de ce chapitre nous utiliserons une tête de meulage neuve avec des abrasifs d'un diamètre moyen de $46\ \mu\text{m}$, lié avec de la résine et un taux de concentration de 50%.

Le schéma figure 4.1 présente les différentes étapes clés du processus de fabrication d'une cellule triple jonction avec l'intégration de l'amincissement de son substrat. Nous commençons en étape (1) avec la structure de base de III-V épitaxié sur son substrat de Germanium. L'étape (2) est la métallisation des contacts émetteurs de la cellule avec un procédé standard de photolithographie suivi de l'évaporation des métaux et de leur soulèvement puis nous procédons à la gravure de la couche contact. Le collage sur superstrat temporaire (3) permet de maintenir l'intégrité mécanique de la cellule lorsqu'elle sera amincie, la face avant de la cellule avec la métallisation est collé pour laisser apparaître sa face arrière pour amincissement. A l'étape (4) nous intégrons une étape d'amincissement abrasif du substrat puis l'étape (5) correspond au dépôt de métal sur la face arrière. Un collage métallique (6) est effectué permettant de prendre le contact avec la métallisation de la cellule et servant de support mécanique final pour la structure amincie. Enfin (7) nous décollons la cellule pour pouvoir la mesurer. Les étapes demandant un effort de développement sont les étapes (3) et (4), le collage temporaire de la cellule puis l'amincissement du substrat, ainsi que les étapes (5) et (6), le collage métallique ainsi que le retrait du superstrat temporaire.

Les cellules multi-jonctions étudiées dans le cadre de ces recherches se composent de trois jonctions : InGaP/GaAs/Ge : L'architecture classique des cellules photovoltaïques triple jonctions se constitue d'un substrat en Germanium sur lequel, on opère une croissance épitaxiale de plusieurs couches de matériaux III-V. L'épaisseur du substrat de Germanium est typiquement de 170 à $200\ \mu\text{m}$, ceci est l'épaisseur minimale assurant le maintien

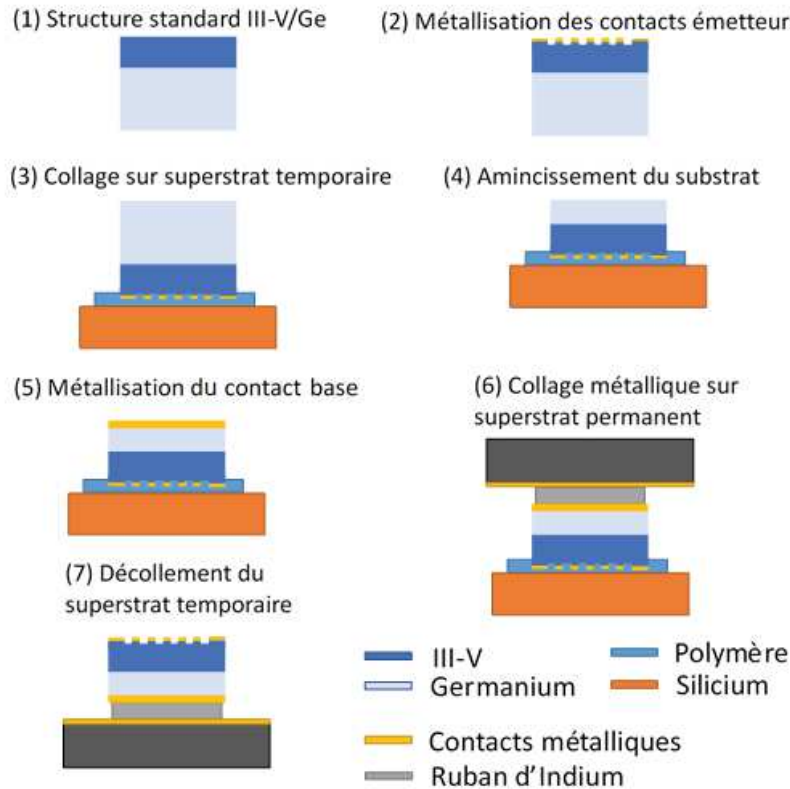


Figure 4.1 Procédé de fabrication d'une cellule triple jonction amincie.

mécanique de la structure. En réalité la partie active du substrat en Germanium n'est que de quelques μm , le reste de l'épaisseur ne sert que de support mécanique à la cellule et ne contribue pas à la création de porteurs de charge. Les rayons lumineux sont totalement absorbés bien avant d'avoir traversé l'épaisseur totale de la cellule. Nous savons donc qu'il est possible de réduire cette épaisseur dans l'optique d'une amélioration de la cellule (réduction du poids, de la résistance thermique, de la résistance série, possibilité de structure tcvc, réduction des recombinaisons. . .)

Nous discuterons dans un premier temps du collage et de l'amincissement d'échantillons de Silicium de petite taille ($< 1\text{cm}^2$), puis nous discuterons de l'amincissement de l'empilement de matériaux caractéristique des cellules triple-jonction (III-V/Ge).

4.2 Procédé de collage pour amincissement d'échantillon

Nous présenterons, dans cette partie, le développement du collage et de l'amincissement abrasif d'échantillons en Silicium avant le transfert du procédé sur Germanium. Pour commencer intéressons nous au collage. Pour cela nous avons testé plusieurs polymères de

collage afin de vérifier leur robustesse au procédé d'amincissement abrasif. Comme notre instrument d'amincissement mécanique n'est compatible qu'avec des gaufres de 4 pouces, ce sera donc une gaufre de Silicium de 4 pouces qui nous servira de support temporaire pour le collage.

Afin de coller l'échantillon sur le substrat de silicium, nous utiliserons un montage illustré par un schéma en figure 4.2 et par une photo en figure 4.3 :

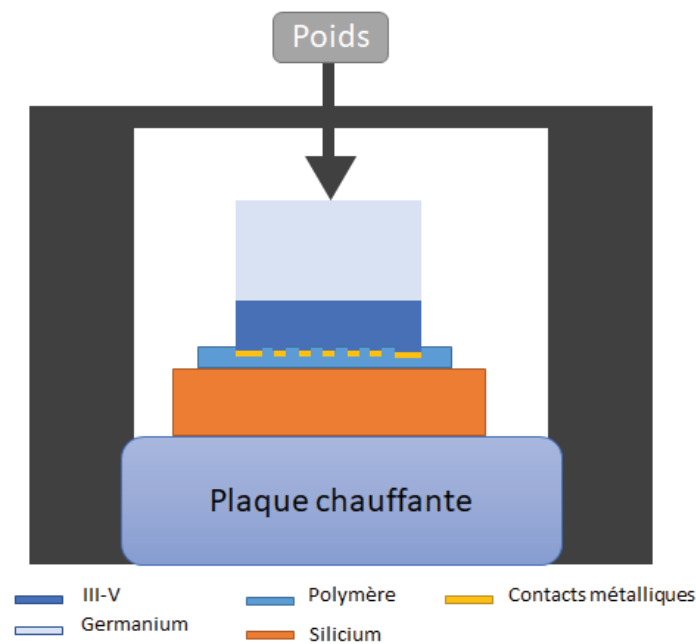


Figure 4.2 Schémas d'une cellule collée sur un support avant amincissement.

le dispositif est placé sur une plaque chauffante, pour élever la température à celle de la transition d'état caoutchouteux du polymère de collage. La température est ensuite redescendue à la température de transition vitreuse, ce qui finalise le collage et permet le maintien mécanique de la structure.

Les températures de transition (caoutchouteux/vitreux) dépendent du polymère utilisé. Afin d'assurer un bon contact mécanique, l'empilement superstrat/polymère/échantillon est placé sous une presse qui appliquera un poids de 500 g sur le dispositif.

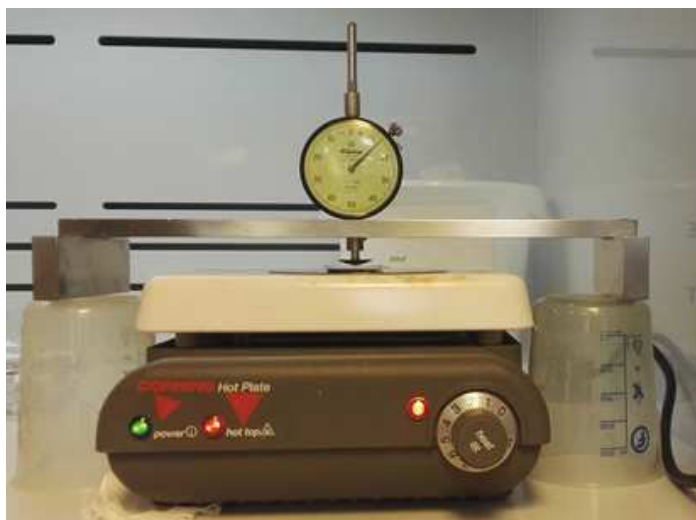


Figure 4.3 Photo du montage de collage.

4.2.1 Méthode de collage

Dans un premier temps, nous étudions différentes possibilités de collage, l'objectif principal est de vérifier la bonne tenue mécanique de ces différents collages lors de l'abrasion mécanique, qui est une étape assez critique. Le risque est que le polymère ne résiste pas aux contraintes de l'amincissement. Nous vérifierons la rugosité obtenue après amincissement pour déterminer si le collage influence ce paramètre, en effet l'échantillon reposant sur un polymère relativement souple, cela pourrait permettre d'absorber les chocs mécaniques des abrasifs. Il faut aussi garder en tête que ce report n'est que temporaire, et qu'il faudra donc pouvoir décoller la cellule après avoir effectué les étapes d'amincissement et l'avoir retransférée sur un substrat de report permanent. Ainsi, deux solutions ont été envisagées : tout d'abord, la résine AZ1512, qui aura notamment l'avantage d'être facilement enlevée lors du décollement du substrat temporaire, et le polymère CR200, qui sera robuste à plusieurs étapes de fabrications, notamment la gravure chimique au peroxyde. Nous testerons aussi un collage fait avec du PDMS, qui est un collage permanent mais a l'avantage d'être transparent. Cela pourrait nous permettre d'éviter de devoir libérer la face avant avec un deuxième collage. Les tests présentés seront effectués avec un échantillon de silicium de 1 cm^2 .

La résine AZ1512 a la possibilité de s'enlever facilement sans laisser de traces sur les surfaces collées, cependant elle n'est pas compatible avec beaucoup d'étapes de micro-fabrication comme les gravures chimiques mais aussi les expositions aux solvants. Elle ne pourrait donc servir que si l'on ne prévoit pas d'autre étapes que le report sur support

permanent après l'amincissement. Deux protocoles de collage de cette résine ont été testés. Dans le premier (illustré figure 4.4), la résine est déposée seulement sur l'échantillon à coller, d'une dimension d'environ $1 \times 1 \text{ cm}^2$. Une gouttelette est déposée à l'aide d'une pipette, puis l'échantillon est retourné et posé sur le substrat de report en Si. L'empilement est ensuite chauffé à 110°C pendant 10 minutes avec application d'un poids de 500g. Dans le deuxième protocole, nous proposons d'étaler la résine sur la gaufre de 4 pouces plutôt que sur l'échantillon, cela permettra d'obtenir un collage plus uniforme car l'épaisseur de la résine étalée sur la gaufre sera plus uniforme que la résine disposée à la pipette sur la face arrière de l'échantillon. La résine est ensuite recuite à 110°C pendant 10 min sous pression mécanique. Le premier protocole quant à lui, aura une plus importante épaisseur de résine, ce qui devrait lui permettre d'avoir un meilleur maintien de l'échantillon.



Disposition de résine AZ1512 sur échantillon : Protocole 1
Gouttelette posée au-dessous de l'échantillon puis empilement
gaufre/résine/échantillons

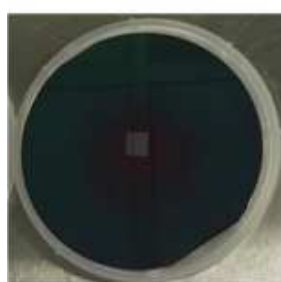
Recuit de résine T ($^\circ\text{C}$) : 110
Durée : 2 min
Méthode : Plaque chauffante + pression

Figure 4.4 Photo illustrant le collage par disposition de résine AZ1512 sur un échantillon.

On remarque qu'avec le premier protocole (figure 4.4) la résine déborde sur les bords de l'échantillons allant même jusqu'à remonter sur la face arrière (l'échantillon étant collé sur la face avant). Cela ne devrait pas nous poser beaucoup de problème, un rapide nettoyage au coton tige imbibé d'acétone permet d'enlever en grande partie la résine excédentaire. S'il reste encore des résidus, l'amincissement abrasif étant mécanique, il n'y a pas de risque de masquage et la résine sera enlevée en même temps que le substrat.

Sur la figure 4.5, illustrant le deuxième protocole de collage à la résine AZ1512, on ne remarque plus la résine remonter par-dessus l'échantillon, et pour cause à cette vitesse de spin l'épaisseur de la résine est d'environ $1,4 \mu\text{m}$. Ce qui devrait être plus faible que précédemment et surtout plus contrôlée puisque nous ne connaissons pas l'épaisseur que l'on dispose avec la pipette. Le doute ici est posé sur la capacité de ce collage à résister à l'étape d'amincissement.

L'autre polymère envisagé est la CR200. Nous présentons ici le protocole utilisé pour ce collage. La CR200 est un collage résistant à la plupart des étapes de micro-fabrication. Cependant elle devient plus visqueuse à la température de 180°C , les procédés à haute tem-


Étalement de résine AZ1512 sur gaufre : protocole 2

Vitesse (rpm) : 3000

Durée (s) : 30

Empilement gaufre/résine/échantillons

Recuit de résine T (°C) : 110

Durée : 2 min

Méthode : Plaque chauffante + pression

Figure 4.5 Photo illustrant le collage par étalement de résine AZ1512 sur une gaufre.

température excédant les 180°C ne seront donc pas réalisables. La CR200 est difficile à enlever et peut laisser des traces sur la surface collée. Ce collage sera à favoriser si par exemple on souhaite procéder à une étape de gravure chimique après l'amincissement mécanique. Pour effectuer ce collage, une gouttelette est posée sur la face avant de l'échantillon puis chauffé à 120°C pendant 3 min permettant ainsi au polymère de se solidifier. Pour effectuer le collage, on chauffe préalablement la CR200 à une température de 180°C pendant 10 min. Cela permet d'évaporer les solvants du polymère, à cette température il se trouve à l'état caoutchouteux. On peut donc, toujours à une température de 180°C, placer l'échantillon sur le substrat en lui appliquant une pression pendant 2 min. Le collage se termine en réduisant la température.


Disposition de CR200 sur échantillon

Gouttelette posée au-dessous de l'échantillon

1er recuit 120 °C 3 min

Hard bake à 180°C pendant 10 min, juste avant le collage

Empilement gaufre/CR200/échantillon

Collage 180 °C 2 min avec pression sur l'échantillon

Méthode : Plaque chauffante + pression

Figure 4.6 Photo illustrant le collage par disposition de CR200 sur un échantillon.

La figure 4.6, représente le collage de CR200. Sur la photo on peut voir le CR200 remontant sur les bords mais ne débordant pas jusqu'à remonter sur la face arrière de l'échantillon. L'amincissement abrasif enlèvera les résidus de résine, cela ne devrait pas nous poser de problèmes.

Le dernier collage investigué est effectué avec du PDMS, ici l'intérêt premier de ce collage est qu'il transparent et permanent. Par conséquent, coller la face avant d'une cellule

photovoltaïque sur un support en quartz avec du PDMS permettrait de laisser passer la lumière sur la partie active de la cellule nous évitant ainsi de devoir libérer la face avant de la cellule amincie avec un deuxième collage sur la face arrière. La problématique de ce collage serait alors de pouvoir contacter les contacts électriques présents sur la face avant de la cellule. C'est pourquoi il devient d'autant plus pertinent si les contacts émetteurs habituellement en face avant de la cellule se retrouvent en face arrière, comme c'est le cas pour une structure TCVC comme vu au chapitre 2. La fabrication d'une cellule avec une telle structure est actuellement développée par Mathieu De LaFontaine dans le cadre de son doctorat.

La figure 4.7 est un schéma illustrant la possibilité d'un amincissement d'une cellule avec contacts en face arrière, ici on voit l'intérêt d'un collage transparent sur la face avant. L'amincissement permettant de révéler les contacts émetteurs sur la face arrière, tous les contacts seront donc pris sur cette même face.

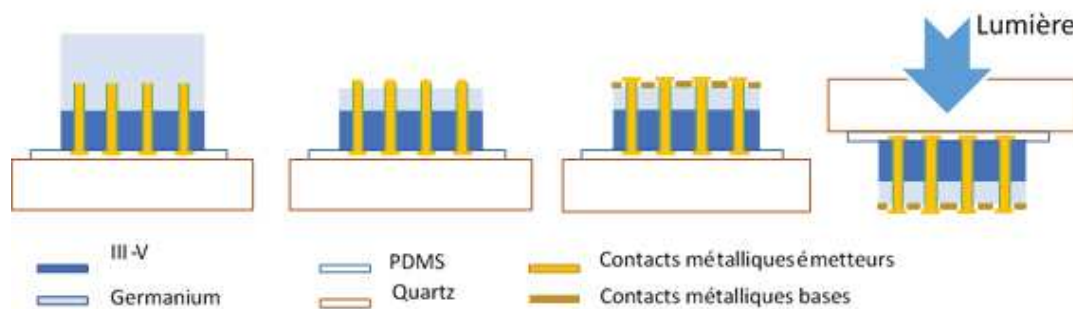


Figure 4.7 Schéma d'un procédé de collage pour un amincissement de cellule photovoltaïque avec structure TCVC.



Figure 4.8 Photo illustrant le collage par étalement de PDMS sur un échantillon.

On remarque sur la photo du collage PDMS de la figure 4.8, que le PDMS remonte par-dessus l'échantillon, cela ne devrait pas nous poser de problèmes et sera enlevé pendant l'amincissement.

Une fois les échantillons collés avec les méthodes présentées ci-dessus, ceux-ci ont tous subi un amincissement de $100\ \mu\text{m}$. Ils ont été amincis par abrasion mécanique à $30\ \mu\text{m}/\text{min}$, avec une vitesse de rotation du support à gaufre de 14 RPM. Ces paramètres correspondent au meilleur compromis entre vitesse d'amincissement et qualité de surface obtenue, comme nous l'avons vu au chapitre 2.

De plus $30\ \mu\text{m}/\text{min}$ est une vitesse plutôt élevée, comme l'intérêt de ce test est de vérifier le maintien mécanique des collages pendant un amincissement autant commencer avec une vitesse d'amincissement plutôt élevée. Si les collages résistent à cette vitesse ils devraient résister à des vitesses plus faibles également.

Après amincissement, tous les collages ont résisté au procédé, aucun des échantillons n'a été brisé ni décollé. On peut donc conclure que les collages à la résine AZ1512, au CR200 et au PDMS sont robuste au procédé d'amincissement abrasif. On peut continuer l'étude en s'intéressant à la rugosité obtenue après amincissement afin de vérifier si on note des différences significatives entre les différents collages et avec ce qui avait été obtenu sur une gaufre complète dans le chapitre 2.

La mesure de rugosité sera effectuée à l'aide d'un profilomètre mécanique :



Figure 4.9 Schémas illustrant un échantillon et les 6 points de mesure de rugosité.

Comme l'illustre la figure 4.9, six points de mesure (représentés en orange) sur une longueur de $100\ \mu\text{m}$ sont répartis le long de l'échantillon de 1cm^2 (représenté en bleu). La valeur de la rugosité arithmétique présentée dans les résultats correspond à la valeur moyenne obtenue lors des six mesures ainsi que sont écart-type.

$$R_a = \text{valeur moyenne} \pm \text{écart-type}$$

La figure 4.10, nous permet de comparer les rugosités obtenues après amincissement de chaque collage présenté précédemment. On peut voir sur le graphique que tous les échantillons ont une rugosité inférieure à ce que l'on avait obtenu pour l'amincissement d'une gaufre complète.

Tous les collages sont robustes à l'étape d'amincissement et les rugosités obtenues ne sont pas significativement différentes. On peut, par conséquent, choisir indifféremment de

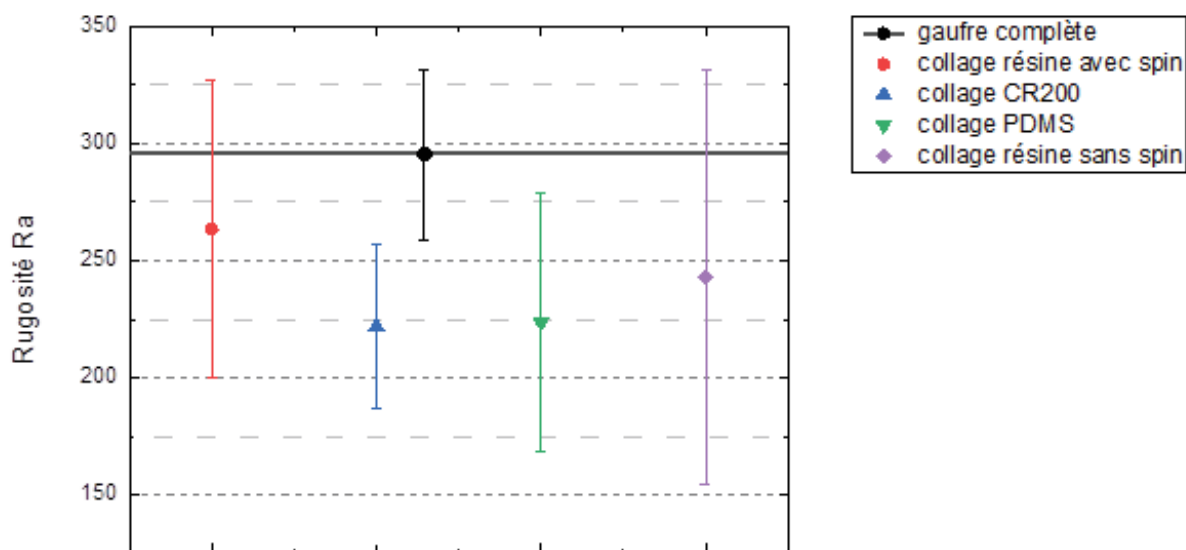


Figure 4.10 Graphique représentant la rugosité R_a de différentes méthodes de collage.

ces deux critères (robustesse au procédé, et rugosité obtenue) les 4 différentes méthodes de collage. La rugosité systématiquement inférieure à la rugosité mesurée sur une gaufre complète au chapitre 2 peut éventuellement s'expliquer par le fait que le collage peut aider à l'amortissement des chocs du procédé, les polymères étant souples. Cependant il faut tout de même préciser que les 5 mesures de rugosité faites, dans le chapitre 2, sur une gaufre de 100 mm ne permettent pas d'avoir une valeur précise de la rugosité moyenne sur toute sa surface. De plus les écart-types permettent de nuancer notre conclusion car les rugosités obtenues avec les collages ne sont que légèrement inférieures à la rugosité obtenue avec la gaufre complète.

4.3 Amincissement de matériaux III-V/Ge

4.3.1 Amincissement abrasif

Nous savons désormais amincir des échantillons de Silicium. Cependant, dans l'objectif de fabriquer des cellules triple-jonctions amincies par abrasion mécanique, nous allons devoir nous intéresser à l'amincissement de la face arrière d'un échantillon de III-V/Germanium, soit le Germanium. Celui-ci étant le composant classique du substrat d'une cellule photovoltaïque à triple jonction.

Sur l'image d'un microscope électronique à balayage de la figure 4.11 on peut observer 8 μm de matériaux III-V sur un substrat d'environ 174 μm de Germanium.

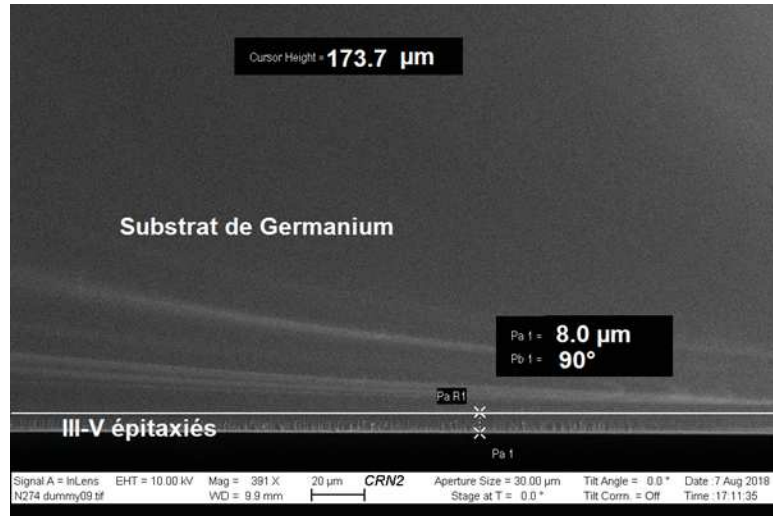


Figure 4.11 Image au microscope électronique à balayage des matériaux d'une cellule triple jonction classique.

Dans la suite du document nous allons estimer la quantité de Germanium amincie en faisant la soustraction de la mesure d'épaisseur faite avant et après amincissement de notre échantillon, sachant que le substrat mesure $174\ \mu\text{m}$ d'épaisseur. Nous avons choisi de coller nos cellules avec de la CR200. Cette colle a l'avantage de ne pas réagir à la solution de H_2O_2 , nous permettant ainsi de continuer l'amincissement du substrat par voie chimique afin par exemple d'enlever la couche endommagée par les défauts induits par l'abrasion, ou de fabriquer une double jonction III-V en gravant l'entièreté du Germanium.

Dans un premier temps, nous allons coller l'échantillon III-V sur un wafer sur lequel nous avons étalé la CR200 à 1000 RPM, l'amincissement abrasif sera quant à lui à une vitesse de $30\ \mu\text{m}/\text{min}$ puis $5\ \mu\text{m}/\text{min}$ pour les derniers $20\ \mu\text{m}$ de Germanium à amincir.

La photo de la figure 4.12 à été prise après l'amincissement, il ne reste plus que $40\ \mu\text{m}$ de Germanium.



Figure 4.12 Photo d'un échantillon III-V/Ge aminci à une vitesse de $30\ \mu\text{m}/\text{min}$ puis $5\ \mu\text{m}/\text{min}$.

On se rend compte, sur cette image, que le bord droit ainsi que le coin inférieur droit ont été cassés durant le procédé d'abrasion. La vitesse d'amincissement est probablement trop élevée pour des matériaux fragiles comme le Germanium. Pour vérifier cette hypothèse nous avons mené deux autres amincissements à des vitesses beaucoup plus faibles :

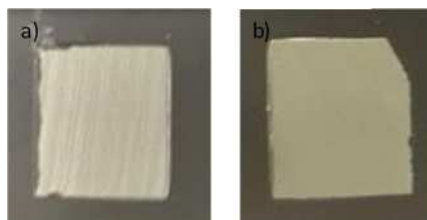


Figure 4.13 Photo d'un échantillon III-V/Ge prise après amincissement à une vitesse de, a) $10\text{ }\mu\text{m/min}$ puis $2\text{ }\mu\text{m/min}$, et b) à une vitesse de $5\text{ }\mu\text{m/min}$ puis $2\text{ }\mu\text{m/min}$ pour les 20 derniers μm de Germanium amincis.

La figure 4.13 représente deux photos prises après amincissement, 4.19a) a été aminci à une vitesse de $10\text{ }\mu\text{m/min}$ puis à une vitesse de $2\text{ }\mu\text{m/min}$ pour les 20 derniers microns de Germanium à amincir et 4.19b) a été aminci à $5\text{ }\mu\text{m/min}$ puis à $2\text{ }\mu\text{m/min}$ pour les 20 derniers microns de Germanium à amincir jusqu'à $40\text{ }\mu\text{m}$ de Germanium restant. On remarque sur les photos aucune amélioration par rapport au premier amincissement réalisé. Diminuer la vitesse d'amincissement ne nous a pas permis d'éviter la brisure des bords de nos échantillons.

Un autre paramètre peut être à l'origine de ces bris, la planéité du collage.

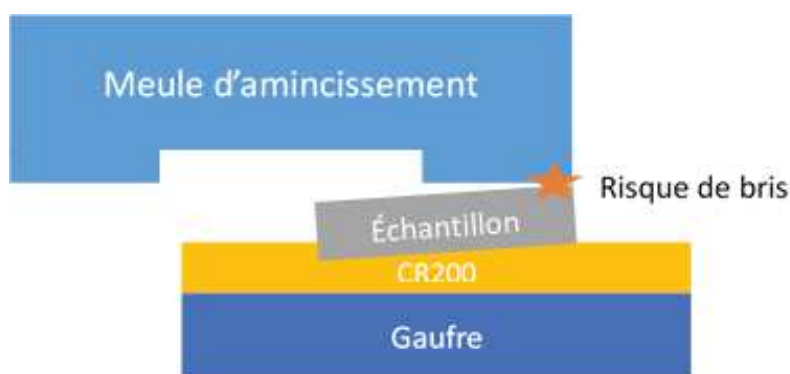


Figure 4.14 Schéma illustrant l'importance de la planéité du collage pour l'amincissement.

En effet, comme illustré sur la figure 4.14, si la pente de l'échantillon est trop élevée, la pression s'exerçant sur le côté le plus élevé peut devenir trop forte et briser l'échantillon. Mettons donc en parallèle la planéité du collage et les brisures observées sur les échantillons amincis.

La figure 4.15, permet de visualiser la corrélation entre collage et brisure lors de l'aminçissement, sur cette figure on retrouve sur la droite une photo après aminçissement des 3 échantillons précédemment discutés, sur la gauche, se trouve pour chaque échantillon, un schéma indiquant les mesures en μm effectuées au profilomètre mécanique de la hauteur de marche entre la CR200 et le dessus de l'échantillon avant aminçissement.

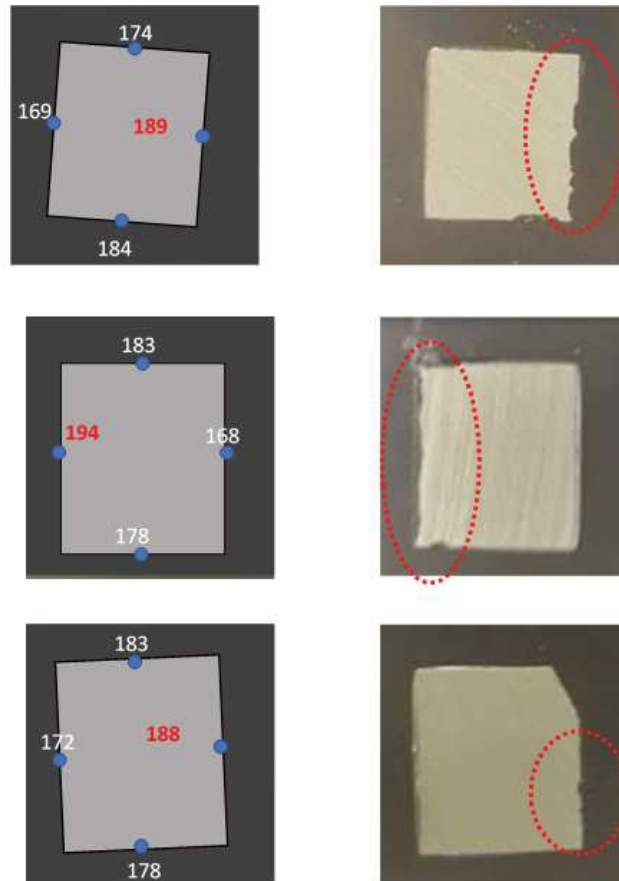


Figure 4.15 Illustration de la corrélation entre l'épaisseur en μm mesurée sur quatre bords, et les brisures après aminçissement.

On remarque en rouge que les zones les plus élevées correspondent aux zones de brisures obtenues après aminçissement. La planéité du collage joue donc un rôle essentiel dans la qualité de l'aminçissement, dans notre cas, à cause d'une mauvaise maîtrise du collage nous n'avons pas été capable d'amincir les échantillons de III-V/Ge sans bris. Nous avons donc essayé d'améliorer notre méthode de manipulation pendant le procédé de collage, par exemple en étant plus précis sur le point d'application de la pression, en l'appliquant plus au centre de l'échantillon. L'utilisation d'un support en verre permettant de mieux répartir la force entre la pointe et l'échantillon a grandement facilité la manipulation. Sur la figure 4.16, on peut voir que la différence de hauteur maximale entre les quatre

mesures effectuées est de $5\text{ }\mu\text{m}$, ce qui est une nette amélioration par rapport aux trois collages précédant dont cette valeur était dans le pire des cas $30\text{ }\mu\text{m}$ et dans le meilleur des cas $16\text{ }\mu\text{m}$.

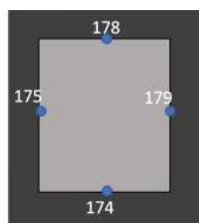


Figure 4.16 Schéma des mesures de planéité du collage avec un meilleur contrôle dans la manipulation du procédé.

Pour mettre toutes les chances de notre côté nous avons décidé de procéder à un amincissement très lent, avec les paramètres décrits dans la figure 4.17 :



Figure 4.17 détails des paramètres d'amincissement pour l'échantillon avec un collage amélioré.

Le premier amincissement permet d'aplanir l'échantillon pour éviter de casser les bords en amincissant très lentement, $1\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ pendant $10\text{ }\mu\text{m}$. Puis on accélère un peu l'amincissement avec une deuxième étape à $5\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$, puis on finit avec une troisième vitesse de $1\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ sur les 5 derniers μm , pour finalement laisser $40\text{ }\mu\text{m}$ de Germanium.

La photo de la figure 4.18, prise après amincissement montre que l'échantillon a subi beaucoup moins de cassures lors du procédé d'amincissement que les trois autres précédents.



Figure 4.18 Photo après amincissement du collage avec une meilleur planéité.

On peut voir sur la figure 4.19, une photo prise au microscope optique, qui correspond à un bord de l'échantillon, vu du dessus, qui a été aminci. La mesure de profilomètre, située en-dessous de la photo, correspond à une mesure de profil suivant la flèche rouge présente sur la photo. La zone orange représente l'échantillon et la zone bleu à la CR200. On se rend compte que la CR200 est montée sur les bords de l'échantillon pendant le collage.

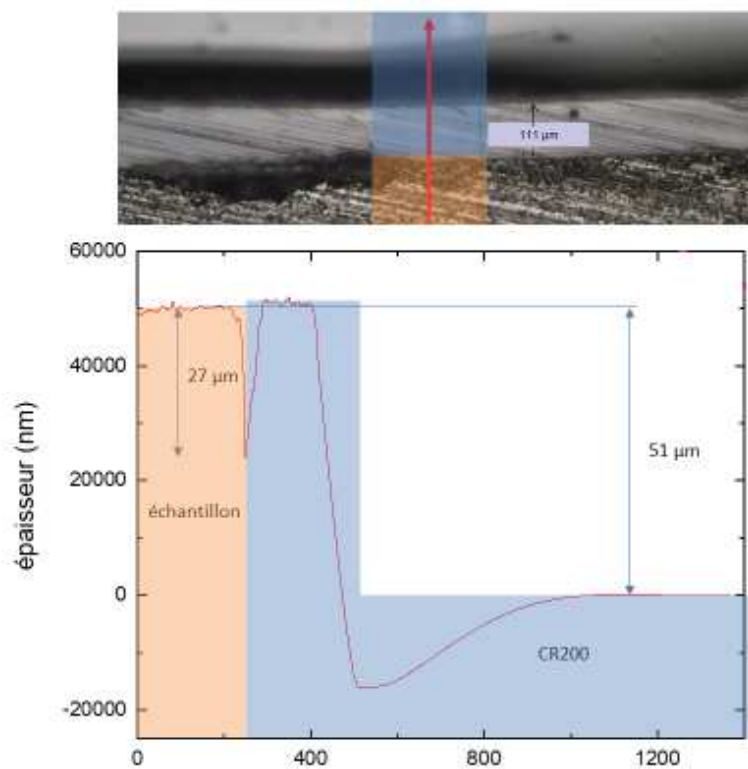


Figure 4.19 Mesure de profil et photo au microscope optique d'un bord d'un échantillon aminci.

En effet, on observe sur l'image du microscope optique deux parties distinctes possédant les stries caractéristiques d'un amincissement abrasif. Sur la photo, la zone amincie se

distinguant de l'échantillon mesure 111 μm . Aussi, avec la mesure au profilomètre mécanique, on peut identifier le collage CR200 et l'échantillon aminci. Cette configuration pourra éventuellement nous poser un problème en cas de gravure par voie chimique.

4.3.2 Amincissement chimique

La gravure chimique nous permet de continuer à amincir le substrat sans l'endommager en profondeur, en effet il est connu dans la littérature que les procédés abrasifs provoquent des défauts non seulement à la surface du matériau usiné mais aussi en profondeur[41]. Selon les procédés d'abrasion on peut noter des défauts se propageant jusqu'à plusieurs dizaines de microns sous la surface. Ainsi il est judicieux de mettre en place un deuxième procédé d'amincissement permettant d'éliminer la couche endommagée par l'usinage abrasif. Nous avons donc décidé de développer un procédé de gravure chimique. La solution de gravure de Germanium choisi est le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) chauffé à 50°C . Choisi notamment par sa facilité de mis en place ainsi que de sa grande sélectivité par rapport aux III-V. La figure 4.20 représente un schéma de la gravure chimique du substrat Ge. Dans un bain-marie, est placé un bécher contenant du H_2O_2 , chauffé à 50°C contrôlé grâce à un thermomètre. L'échantillon est plongé dans la solution H_2O_2 et maintenu dans un porte échantillon, lui-même soutenu par une potence. Le tout est placé sous agitation magnétique afin d'assurer un meilleur renouvellement de la solution (la solution étant complètement remplacée toute les 2h). La gravure d'une quarantaine de microns de Ge se fait dans un temps de l'ordre de 4h30.

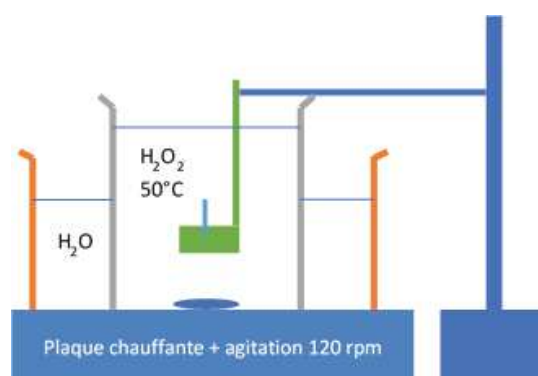


Figure 4.20 Schéma de l'installation de la gravure chimique.

La figure 4.21 rapporte les mesures au profilomètre mécanique d'un échantillon ayant 40 μm de Ge restants, avant et après gravure pendant 4h30 dans le peroxyde d'hydrogène chaud. Le collage CR200 a très bien tenu la durée de la gravure chimique. Les mesures de profilomètre montrent qu'on a bien gravé les 40 μm de Ge restants, mais viennent surtout confirmer la présence de CR200 remontant sur les bords de l'échantillons, déjà mis en

évidence dans la figure 4.25. La vitesse de gravure dans le peroxyde chaud est d'environ $10 \mu\text{m}/\text{heure}$.

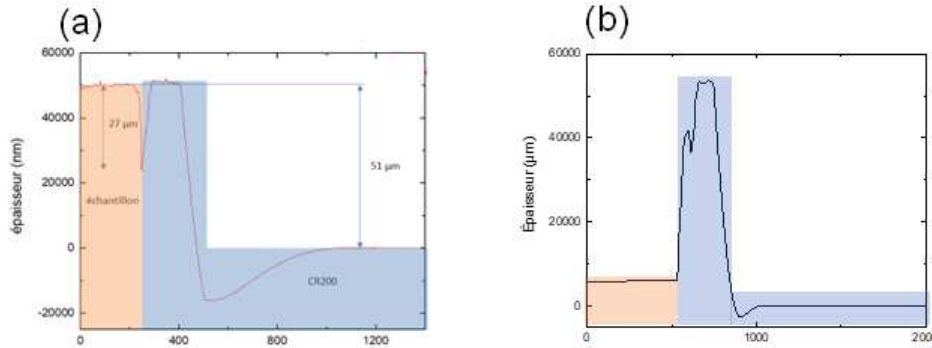


Figure 4.21 mesures au profilomètre mécanique d'un échantillon aminci avec $40 \mu\text{m}$ de Germanium restant a) avant gravure chimique, b) après gravure chimique.

La CR200 sur les bords de notre échantillon pourrait s'avérer être problématique pour le report sur substrat permanent (deuxième collage du procédé) de l'échantillon. Nous allons aborder ce sujet lors du prochain chapitre lorsque nous traiterons de ce collage. Nous l'avons vu précédemment, la planéité du collage joue un rôle essentiel dans l'amincissement abrasif, c'est la raison pour laquelle nous avons décidé d'effectuer un collage avec une épaisseur réduite de CR200 afin de mieux maîtriser la planéité du collage. De plus cela nous permettra de réduire la remontée sur les bords de la CR200. D'après la datasheet du constructeur, avec un étalement à 1000 rpm, on obtient une épaisseur supérieure à $20 \mu\text{m}$. Nous avons fait des essais d'étalement à 3000 rpm et 5000 rpm.

L'étalement à 5000 rpm donne une épaisseur de CR200 de $4 \mu\text{m}$, valeur vérifiée à l'aide d'un microscope électronique. Les deux prochains tests d'amincissement présentés seront effectués avec un collage d'une épaisseur de CR200 de $4 \mu\text{m}$ et avec une vitesse amincissement de $1 \mu\text{m}/\text{min}$. Les deux échantillons ont ensuite été gravés dans du peroxyde à 50°C jusqu'à retrait total de tout le Germanium.

La figure 4.22, représente des mesures de profil, le long de la largeur de deux échantillons, effectuées durant les étapes clés du procédé d'amincissement soit le collage, l'amincissement abrasif (grinder) et la gravure chimique au H_2O_2 après 1h de gravure, et après 1h supplémentaire (i.e. 2h de gravure chimique). L'échantillon 1 a été aminci jusqu'à $40 \mu\text{m}$ de Germanium par abrasion et l'échantillon 2 quant à lui a été aminci jusqu'à $30 \mu\text{m}$ de Germanium restants. Le taux de gravure du peroxyde pour les échantillons 1 et 2 a été respectivement de 12.5 et $11.5 \mu\text{m}/\text{heure}$. La pente (différence de hauteur entre les deux bords de l'échantillon) après amincissement abrasif est de $4 \mu\text{m}$ sur 0.66 mm pour l'échantillon 1 et de $6 \mu\text{m}$ sur 0.66 mm pour l'échantillon 2. Les résultats obtenus avec l'échantillon

2 sont moins positifs puisque la pente est plus élevée. Cette différence est probablement due aux variables de collage comme le positionnement de l'échantillon sur la gaufre ou l'homogénéité d'épaisseur de CR200. Elle peut aussi être due à la non-répétabilité de l'outil d'amincissement sur de petites surface d'amincissement puisqu'il n'est pas prévu à cet effet. Le meilleur résultat obtenu jusqu'à maintenant est une pente de $1\text{ }\mu\text{m}$ sur 0.76 mm obtenus après amincissement abrasif.

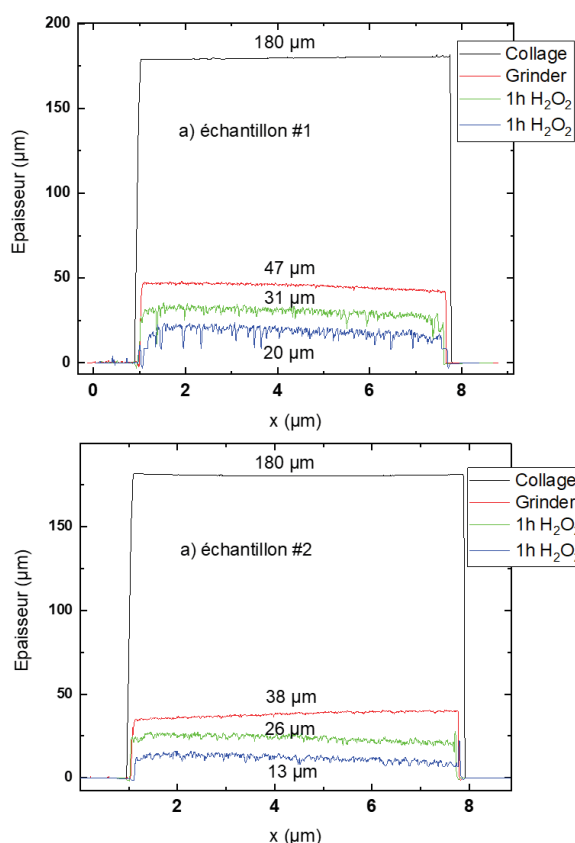


Figure 4.22 mesure au profilomètre, à plusieurs étapes d'amincissement, du profil de largeur de deux échantillons amincis.

Le résultat marquant de ces deux tests d'amincissement est l'observation de zones préférentiellement gravées par le peroxyde : La figure 4.23, est une photo de la surface de Ge de l'échantillon 1, prise après 1h de gravure au peroxyde d'hydrogène. on voit en couleur foncée le germanium, mais on voit également quelques zones bien plus claires suivant les stries laissées par l'amincissement abrasif.

Ce sont très probablement des zones où l'on aperçoit les matériaux III-V et où le Germanium a déjà été complètement gravé. En effet, l'effet miroir observé est caractéristique de



Figure 4.23 Photo de la surface de germanium aminci puis gravée pendant 1h dans la solution H_2O_2 .

la couche de III-V qui joue le rôle de etch-stop et les mesures au profilomètre confirment cette hypothèse.

Nous nous sommes intéressés à l'évolution de la rugosité suite à l'ajout de cette étape de gravure chimique. La figure 4.24 permet donc de comparer la rugosité d'une surface après grinding sans gravure chimique avec une surface après grinding + 1h de gravure humide.

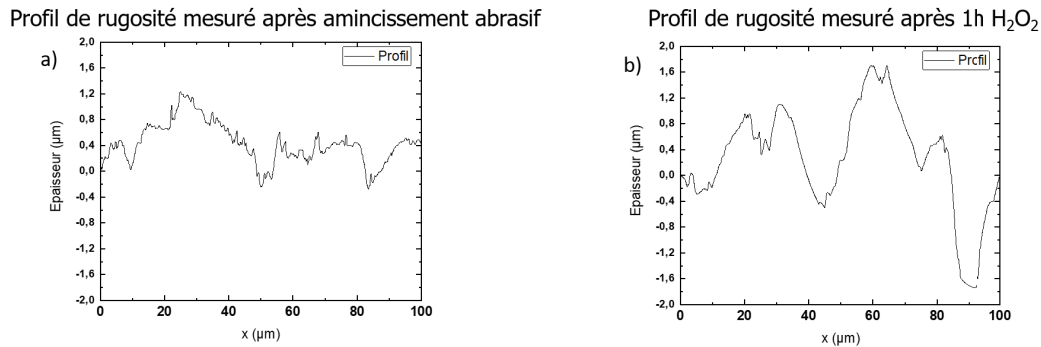


Figure 4.24 Mesure d'un profil de rugosité a) après l'amincissement mais avant la gravure chimique et b) après 1 heure de gravure chimique.

Les deux mesures n'ont pas pu être mesurées exactement au même endroit mais sont très proches l'une de l'autre. On observe que globalement les plus gros sillons se sont accentués et que les petites aspérités se sont lissées. C'est la tendance à laquelle l'on pouvait s'attendre d'un procédé de gravure fortement isotrope. La rugosité R_a passe de 235,8 nm à 630,1 nm et la rugosité R_t de 1516,4 nm à 3441,7 nm. Cela montre qu'avec un amincissement par meulage suivi d'une gravure chimique, nous aurons probablement besoin d'un polissage pour assurer la planéité de l'amincissement.

Par la suite, en finissant d'enlever complètement le Germanium de l'échantillon avec la gravure chimique, on se rend compte que les zones de gravure préférentielles étaient finalement des cracks s'étant même propagés en profondeur jusqu'aux III-V. En effet, on peut voir sur la figure 4.25 une photo prise au microscope de la surface de l'échantillon une fois que tout le Ge ait été gravé, donc la surface de III-V. Celle-ci présente des cracks, qui sont initiés dans la même direction que celle des stries laissées par le grinder.



Figure 4.25 cracks dans le III-V d'un échantillon dont le germanium a été complètement aminci.

L'un des paramètres qui peut influencer sur la présence de cracks ou sur les III-V après amincissement abrasif est la quantité de Germanium amincie. Cependant nous avons constaté que pour la même quantité de Germanium amincie, un collage plus épais nous permettait d'éviter l'apparition des cracks observés avec un collage moins épais. La prochaine étape de nos tests d'amincissement fut donc de mettre en corrélation la quantité de Germanium amincie, l'épaisseur du collage CR200 et l'apparition de cracks sur la couche de III-V.

Le tableau 4.1 récapitule les conditions pour lesquelles nous obtenons, ou pas, de cracks en profondeur jusqu'aux structures en matériaux III-V. C'est donc avec un collage avec une CR200 épaisse et en laissant au moins $15\text{ }\mu\text{m}$ de Germanium restants que nous nous débarrassons des cracks. Il faudra donc rester dans ces conditions pour la suite de nos expériences.

Nous avons vu que la planéité du collage était un prérequis pour amincir des échantillons III-V/Ge sans brisure. Nous avons également mis en évidence, par gravure chimique, que l'amincissement abrasif laisse des dommages en profondeur allant jusqu'à fissurer les couches de III-V. Nous avons vu que l'épaisseur du collage ainsi que la quantité de Germanium abrasée avait une influence directe sur la présence ou non de fissures. Pour éviter l'endommagement des matériaux nous avons conclu qu'un collage épais (environ $30\text{ }\mu\text{m}$ de

Tableau 4.1 Corrélation entre la quantité amincie, l'épaisseur de collage et l'apparition de cracks sur les matériaux III-V.

Quantité de Germanium restant après amincissement mécanique	Épaisseur de CR200 : 4 μm	Épaisseur de CR200 : 30 μm
15 μm	présence de cracks profondeur : 15 μm	présence de cracks profondeur : 15 μm
20 μm	présence de cracks profondeur : 20 μm	pas de cracks
30 μm	présence de cracks profondeur : 30 μm	pas de cracks
40 μm	présence de cracks profondeur : 40 μm	pas de cracks

CR200) était nécessaire. Aussi la quantité limite de Germanium restant après amincissement doit être 20 μm , en-dessous de cette épaisseur nous endommageons l'échantillon.

Nous avons réussi à amincir et coller de petits échantillons de III-V/Ge sur des gaufres de 4po en vue d'un usinage abrasif. La planéité du collage et son épaisseur de 30 μm nous ont permis d'atteindre une épaisseur de 20 μm de Germanium restants sans observer de brisures ou de fissures sur l'échantillon. La prochaine étape de développement sera donc le collage métallique de la face amincie afin de libérer la face avant de l'échantillon.

CHAPITRE 5

Collage permanent, et caractérisation d'une cellule solaire amincie

Nous allons dans ce chapitre nous intéresser plus précisément aux deux dernières étapes du protocole d'amincissement précédemment présenté figure 3.24. Ces deux étapes étant le collage métallique et le retrait du superstrat temporaire pour libérer la face avant de la cellule. Cela consiste donc à un report d'un superstrat collé en face avant à un substrat collé en face arrière. Nous discuterons dans un premier temps du développement de ces étapes avec des échantillons de structures III-V/Ge, puis nous appliquerons le procédé entier d'amincissement à une cellule photovoltaïque. Nous discuterons pour finir des résultats des mesures électriques d'une cellule amincie.

5.1 Collage métallique face arrière permanent

Sur la figure 5.1 est représenté le schéma des deux étapes de report, ici les enjeux seront de manipuler une membrane (entre 8 et 40 μm) de matériaux fragiles qui vient de subir une étape d'amincissement abrasif qui risque de les avoir fragilisés.

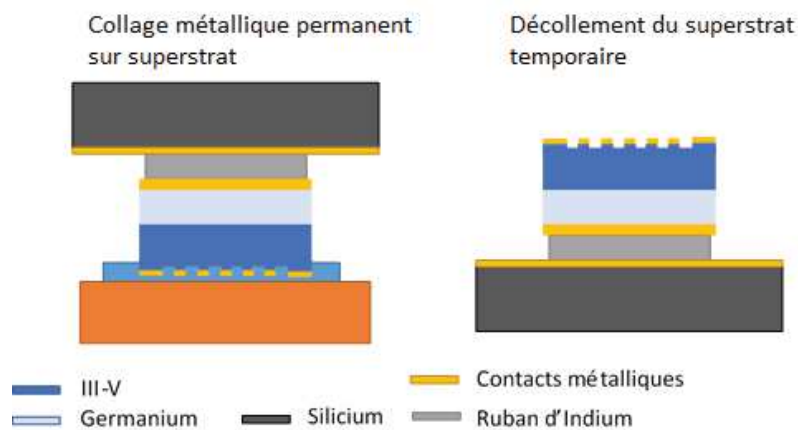


Figure 5.1 Schémas d'une cellule collée sur un support permanent avant et après report.

Le collage que nous allons effectuer à cette étape doit être conducteur pour permettre aux charges, générées par la cellule, d'être récupérées. C'est pour cette raison que nous allons utiliser un collage métallique. Le principe d'un tel collage est de faire fondre un

ruban d'alliage entre deux surfaces métalliques, d'apposer une pression sur l'empilement puis de laisser refroidir à température ambiante. Le ruban d'Indium utilisé, figure 5.1, est un alliage d'Indium à 80%, d'argent à 15% et de plomb à 5%. La température de fusion est de 155°C. Le développement préliminaire sera effectué sur des échantillons III-V/Ge simples sans métallisation en face avant. Dans un premier temps nous allons métalliser la face arrière de notre échantillon aminci ainsi que le superstrat :

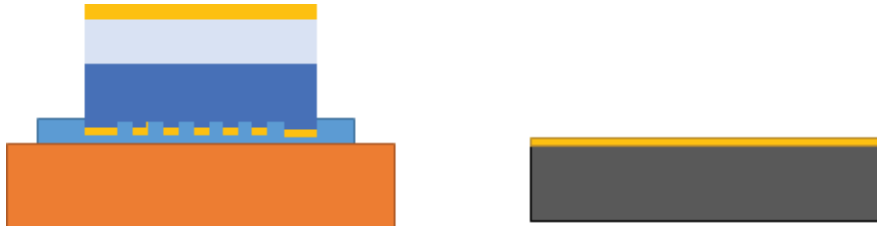


Figure 5.2 Schéma d'une cellule amincie et d'un superstrat, métallisés.

Nous déposons une couche de Nickel et d'or par évaporation sur la face arrière de la cellule amincie et sur le superstrat en Silicium, figure 5.2. Une fois le dépôt terminé nous effectuons un traitement au plasma d'Oxygène afin de rendre les surfaces d'or hydrophiles dans l'objectif d'améliorer leur mouillabilité. Pour éviter tout risque de court-circuit nous avons isolé les bords des échantillons avec de la résine avant l'évaporation des métaux.

On dispose une fine couche de flux désoxydant sur la couche d'or de la face arrière de notre échantillon avant d'y déposer le ruban en alliage d'indium, figure 5.3. On élève ensuite la température à 135°C pendant 3 minutes, ce qui permet au flux de s'évaporer.

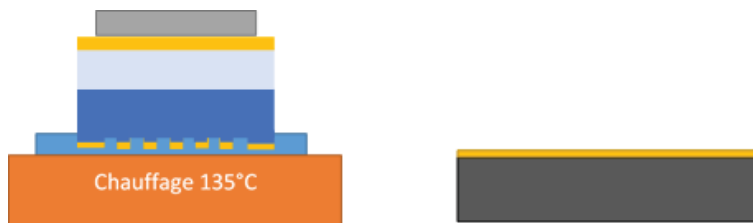


Figure 5.3 Schéma de la mise en place d'un ruban d'indium pour le collage métallique.

Pour finaliser le collage (figure 5.4) on dépose le superstrat sur l'Indium, on monte la température à 170°C puis on applique une pression avec un poids de 500g pour maintenir l'empilement avec le montage de la figure 4.1. Enfin nous pouvons enlever le collage temporaire avec le solvant dédié à la CR200.

Si, comme nous l'avons vu au chapitre 4, nous avons un profil où la CR200 dépasse l'échantillon sur les bords et dont la hauteur est supérieure à celle de l'échantillon post amincissement, cela peut devenir problématique :

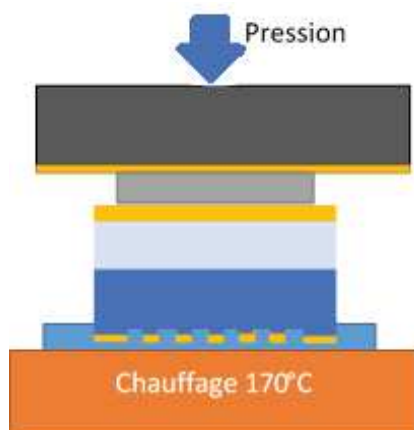


Figure 5.4 Schéma d'un collage métallique au ruban d'Indium.

Sur la figure 5.5 on voit une mesure de profil effectuée sur un échantillon aminci mécaniquement puis gravé dans le peroxyde. Sur cette mesure est schématisé le collage métallique avec la métallisation sur l'échantillon, le ruban d'Indium et le superstrat.

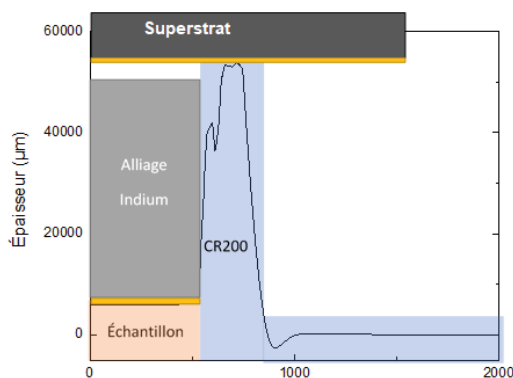


Figure 5.5 Profil de la CR200 remontant sur les bords de l'échantillon avec le ruban d'indium schématisé.

Le ruban d'Indium mesurant $45\text{ }\mu\text{m}$ d'épaisseur, si la marche de CR200 est supérieure à cette valeur comme sur la figure 5.5, le ruban d'Indium risque de ne pas mouiller la surface du superstrat, dans ce cas le collage ne tiendra pas. On peut penser à plusieurs solutions afin de pallier ce problème, mais la façon la plus simple de procéder est de ne pas graver plus de $45\text{ }\mu\text{m}$ de Germanium dans le peroxyde. Ainsi la marche de CR200 n'excèdera pas les $45\text{ }\mu\text{m}$, l'épaisseur d'Indium permettra, par conséquent, d'obtenir un collage réussi.

La figure 5.6, est une photo après collage métallique de la face avant d'une cellule dont le

Germanium à complètement été aminci. La première chose que l'on peut remarquer sur cette photo c'est que le centre de la cellule a brisé.

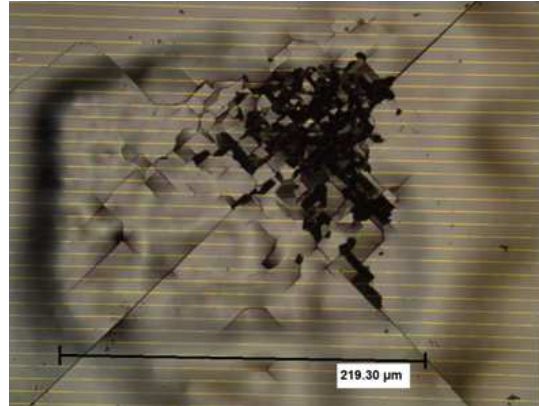


Figure 5.6 Report avec pression d'une cellule amincie (membrane III-V sans Ge).

On remarque de plus un relief de forme rectangulaire à proximité des brisures, ce relief correspond à la taille et à l'emplacement du ruban d'Indium. Notre hypothèse est que la pression appliquée est trop élevée pendant le collage métallique, nous décidons donc d'enlever les poids et de laisser comme seule force, la tension du ressort de l'outil servant à appliquer la pression :

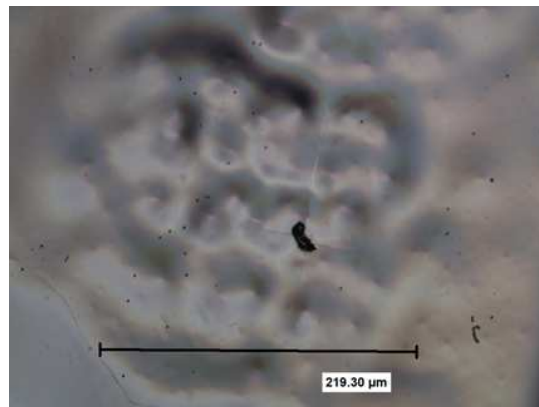


Figure 5.7 Collage métallique sans poids d'un échantillon aminci (membrane III-V sans Ge).

Comme nous pouvons le voir sur la figure 5.7, retirer les poids de notre procédé nous a permis d'améliorer grandement le collage métallique. On peut voir la face avant d'un échantillon aminci, jusqu'au retrait complet du Germanium, après collage métallique. On note une baisse significative des brisures même s'il en reste encore une en plein centre. En revanche on note une topographie autour de cette brisure. Nous décidons de faire plusieurs

collages test entre du silicium et un morceau de verre pour vérifier le comportement de l'Indium, visuellement à travers du verre :

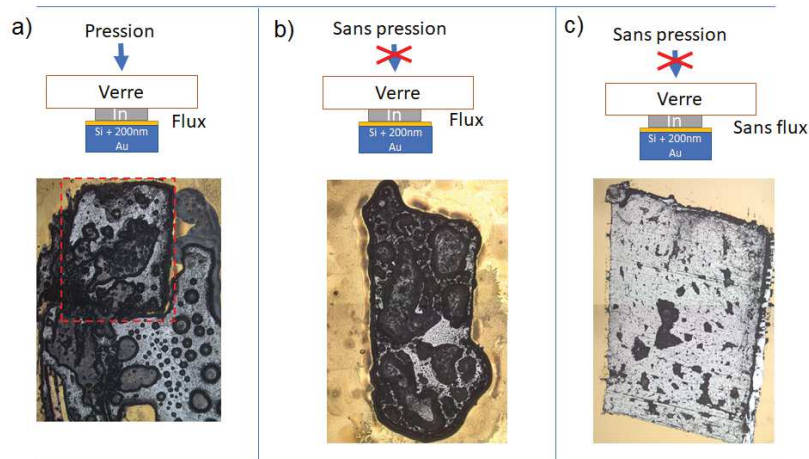


Figure 5.8 Collage métallique Si sur verre (a) avec pression et flux, (b) sans pression avec flux, (c) sans pression sans flux.

La figure 5.8, représente trois collages avec différents paramètres avec une image prise à travers le verre une fois le procédé terminé. En couleurs grises se trouve l'Indium et en couleurs jaunes se trouve l'or. La configuration (a) est celle avec laquelle nous obtenons les résultats présentés précédemment figure 5.7. Pour les configurations (b) et (c) nous n'avons appliqué aucune force pendant le collage, pas même celle du ressort de la pointe d'application du poids, comme c'était le cas pour la figure 5.7. Avec comme variante la présence de flux désoxydant. On voit pour la configuration (a) l'empreinte du ruban, entouré en rouge sur la photo, avant que celui-ci ne s'étende sous la pression de la pointe. En revanche, on voit que lorsque l'on n'appose pas de force le ruban d'Indium ne s'étend pas et reste de la même dimension qu'avant sa fusion. Cela nous permettra de déposer un plus grand morceau d'Indium sans risquer qu'il ne déborde de l'échantillon, répartissant ainsi la force sur une plus grande surface et par conséquent réduisant la pression sur la cellule.

Quant à la présence ou non du flux, on aperçoit une grande différence de contraste lorsque celui-ci est présent. Cela nous indique une topographie peu homogène, cela est causé par le dégazement du flux durant le procédé de collage. Pour éviter ce dégazement trop présent, il faut minimiser l'épaisseur de flux déposée.

Essayons de reporter un échantillon sans flux et sans pression : Sur la figure 5.9, on observe deux images de la face avant d'un collage métallique réussi.

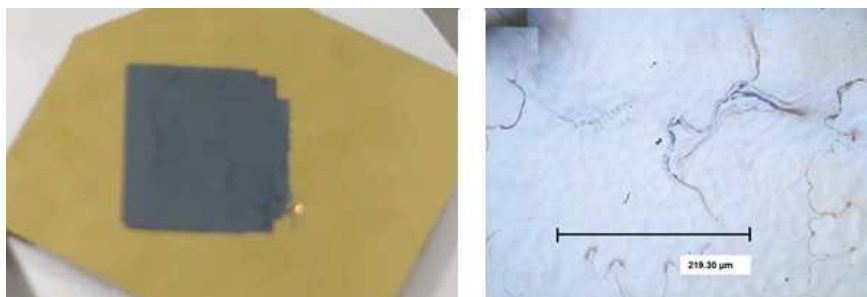


Figure 5.9 collage métallique d'un échantillon aminci réussi.

L'échantillon a été aminci jusqu'à enlever tout le Germanium puis reporté sur un superstrat avec le procédé de collage métallique. Les bords se sont cassés avant le collage métallique, on observe donc aucune brisure ni topographie vu précédemment (ce que l'on voit sur l'image du microscope optique sont des traces de solvant). La configuration optimum pour un collage métallique est donc de maximiser la taille du ruban d'Indium sans appliquer de pression. En évitant l'application de flux nous évitons aussi les problèmes de topographie. Nous avons donc validé le collage métallique de membrane de III-V. Toutes les étapes d'amincissement ont donc été jusqu'à maintenant démontrées possibles. Appliquons ce procédé à la fabrication de cellule photovoltaïque minces.

5.2 Fabrication d'une cellule solaire amincie

Nous avons validé le développement des étapes d'amincissement abrasif, soit le collage temporaire, l'amincissement, le collage permanent et le retrait du collage temporaire. Nous pouvons donc à présent appliquer ce protocole pour la fabrication de cellules photovoltaïques minces.

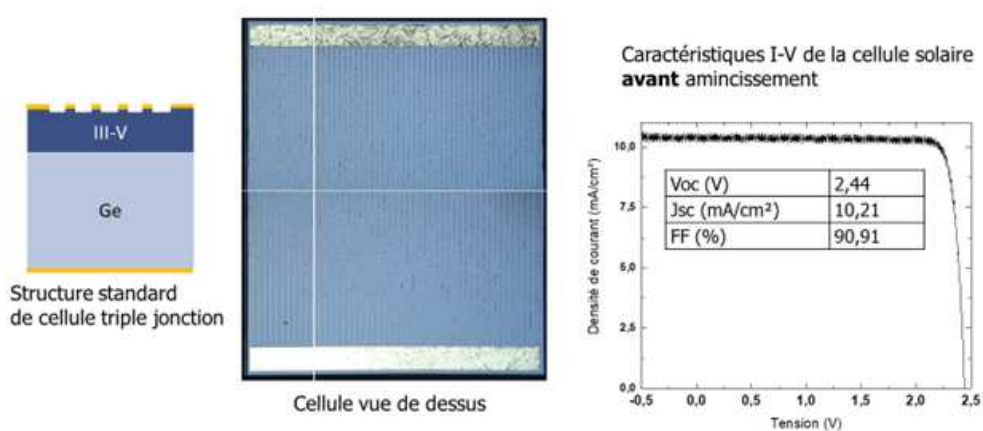


Figure 5.10 schéma et photo d'une cellule triple jonction standard.

La figure 5.10 présente la cellule triple jonction que nous allons amincir, on peut voir les caractéristiques I-V mesurées avant le procédé d'amincissement. Ces caractéristiques ainsi que les photos de sa face avant nous serviront de références auxquelles comparer les résultats obtenus après amincissement.

La figure 5.11 montre les résultats du collage CR200 de la cellule vue précédemment. On peut voir sur les photos la face arrière métallisée de la cellule et deux mesures de profil d'épaisseur, l'un fait sur la longueur (Y) et l'autre sur la largeur (X). La pente mesurée étant de $4\text{ }\mu\text{m}$ sur la longueur et de $3\text{ }\mu\text{m}$ sur la largeur, le collage est uniforme.

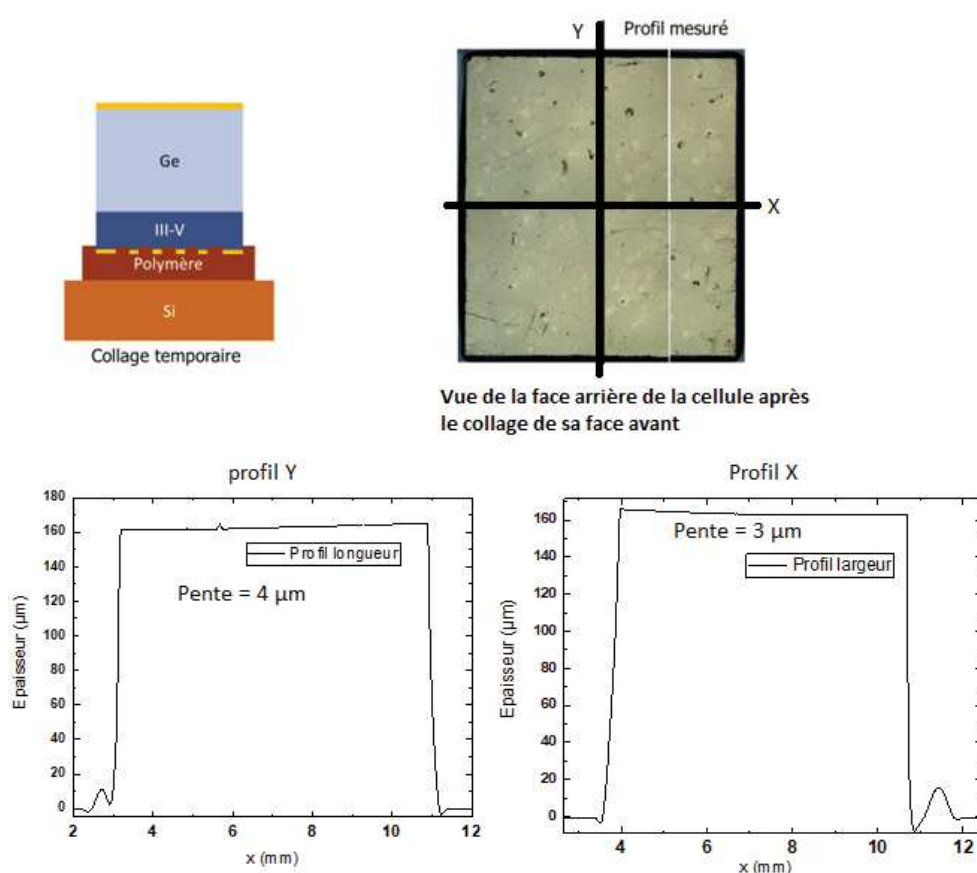


Figure 5.11 Cellule triple jonction collée sur superstrat temporaire.

L'amincissement abrasif (vitesse d'amincissement : $1\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$, vitesse de rotation du plateau : 21.1 RPM, épaisseur du collage : $30\text{ }\mu\text{m}$) s'est déroulé sans brisure de l'échantillon comme l'atteste la figure 5.12. On remarque les stries caractéristiques de l'abrasion sur la surface amincie et les mesures de profil indiquent une uniformité de $2\text{ }\mu\text{m}$ après amincissement, ce qui est un bon résultat. Il reste désormais $40\text{ }\mu\text{m}$ de Germanium sur la face arrière de la cellule.

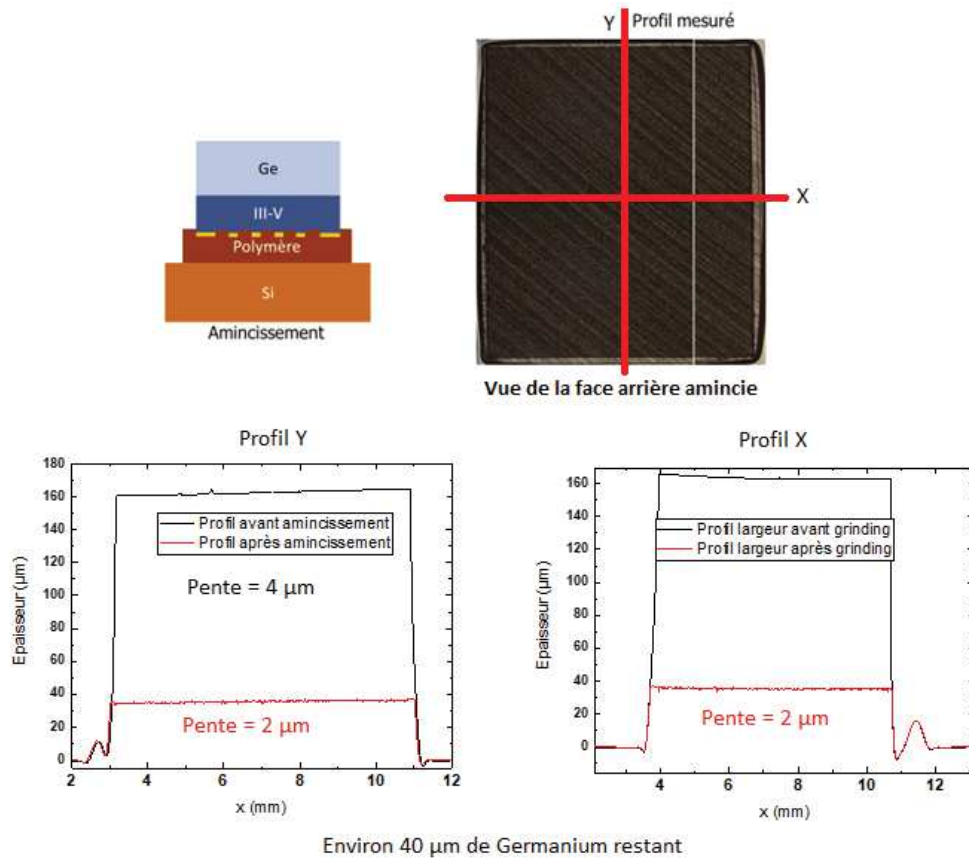


Figure 5.12 Cellule triple jonction collée sur superstrat temporaire et amincie par abrasion.

La dernière étape présentée à la figure 5.13 consiste au report sur substrat permanent, après avoir isolé les bords (en disposant de la résine avec une pipette ou un pinceau) on dépose de l'or sur toute la surface amincie pour ensuite la coller à l'aide d'un ruban d'Indium d'épaisseur de 45 μm sur un substrat de Silicium métallisé, selon le schéma figure 5.13a). Ici on remarque que la cellule est fissurée dans la diagonale, ces fissures semble suivre la même direction que les stries remarquées en figure 5.12. La tache présente est un résidu de CR200.

Malgré les fissures, la cellule est fonctionnelle comme on peut le voir sur les mesures I-V mesurées après amincissement et collage métallique figure 5.13c). En comparant la courbe I-V avant et après amincissement, on voit que le Voc a baissé et le Jsc a augmenté indiquant probablement un court-circuit d'une partie de la cellule. On peut attribuer ces baisses de performance aux fissurations. Les fissures se sont très probablement propagées pendant l'étape d'amincissement abrasif, en effet, elles suivent les stries laissées par cette étape. De plus les fissures apparaissent, pour les mêmes conditions d'amincissement, lorsque l'on

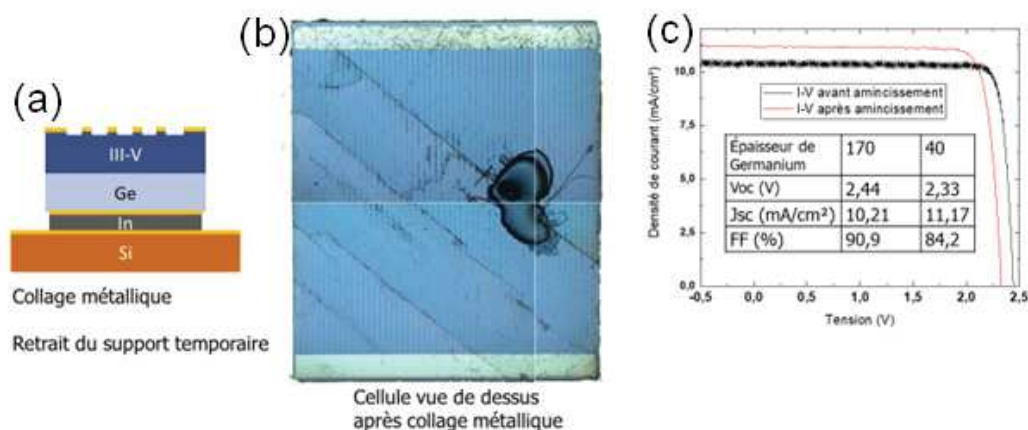


Figure 5.13 report de la cellule triple jonction amincie.

effectue une gravure chimique avant l'étape de report, cette étape de report ne semble donc pas être la cause directe de ces fissurations.

Nous avons pourtant démontré, dans le chapitre 4 pour les mêmes paramètres d'amin-cissement et de collage, que nous étions capables d'amincir le Germanium de $170\text{ }\mu\text{m}$ à $20\text{ }\mu\text{m}$ sans endommager l'empilement III-V. Or, ce qui a été changé ici par rapport au chapitre 4, c'est la présence de métallisation sur la face avant de l'échantillon aminci. En effet, dans le chapitre 4 nous amincissions des structures III-V sur Germanium vierges, sans métallisation. La présence de ces métallisation est peut-être la raison pour laquelle la cellule s'est fissurée durant l'amin-cissement, les grilles de la métallisation peuvent avoir piégé des bulles d'air pendant le collage rendant ainsi la structure plus fragile à l'amin-cissement. Pour pouvoir répondre à cette hypothèse, il faudra étudier l'impact de la présence des métallisations sur les fissurations. Pour cela il serait envisageable d'amincir deux séries d'échantillons issu du même wafer, la première série avec métallisation et la seconde sans métallisation. On ferait varier la quantité amincie avec une vitesse d'amin-cissement et de rotation constante ($1\text{ }\mu\text{m/min}$, 21.1 RPM).

S'il s'avère que les métallisations soient problématiques et causes l'apparition de fissures, il faudra prendre en compte ce phénomène pendant le collage. On pourrait par exemple étaler la CR200 sur l'échantillon plutôt que le wafer puis le passé sous vide pour évacuer les bulles, on pourrait aussi étudier la possibilité de métalliser la face avant une fois la cellule amincie.

Si ce ne sont pas les métallisations qui posent problèmes, on peut éventuellement essayer de changer la CR200 pour un flacon neuf, car nous étions à la fin du flacon de CR200 et il se peut que les propriétés chimiques ne soient plus exactement les mêmes avec le fond

du flacon. On peut également envisager d'aiguiser la tête de meulage, cependant, celle-ci étant neuve, il y a peu de chance que cela change quelque chose. Dans tous les cas il existe une limite d'épaisseur à partir de laquelle nous allons endommager la cellule avec l'amincissement par meulage, il faudra donc étudier la possibilité de continuer le procédé avec une autre méthode d'amincissement pour atteindre des épaisseurs plus faibles.

Finalement, nous avons réussi à coller, amincir et reporter un échantillon de III-V/Ge. Malheureusement une fois testé sur une cellule solaire, c'est-à-dire un échantillon de III-V/Ge avec métallisations en face avant, nous avons rencontré des problèmes de fissures à des conditions qui fonctionnaient lors du développement sur échantillons sans métallisation. Plusieurs optimisations (présentées précédemment) restent à étudier pour éviter ces fissures mais la cellule demeure tout de même fonctionnelle, ce qui est un résultat prometteur.

Finalement, nous avons réussi à mettre en place un protocole d'amincissement abrasif avec des abrasifs de diamètre moyen de $46\ \mu\text{m}$, ce qui pour le type d'instrument utilisé est déjà faible. Il existe cependant des abrasifs de plus petites tailles descendant jusqu'à $15\ \mu\text{m}$ de diamètre moyen. L'acquisition d'une nouvelle tête avec cette taille d'abrasifs devrait permettre de réduire d'avantage les contraintes vues tout au long de ce document. La CMP (chemical-mécanical polishing) est un axes d'étude à envisager pour finir le processus d'amincissement, on pourrait amincir le Germanium avec le procédé de meulage étudié dans cette maîtrise jusqu'à une certaine épaisseur déterminée pour éviter les fissures. Puis, en une deuxième étape, finir l'amincissement avec la CMP qui est une méthode d'amincissement beaucoup moins agressive que le meulage mais plus lente. En procédant avec deux étapes d'amincissement on pourrait envisager la fabrication de cellules très minces sans fissurations.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

Nous avons, durant ces travaux de maitrise, mis en fonctionnement un outil d'usinage par abrasion maintenant disponible au 3IT. Nous avons pu caractériser ses principaux paramètres sur gaufres en Silicium de 4po afin de mieux comprendre la mécanique mise en jeux durant un usinage par abrasion. Nous savons donc que pour contrôler la rugosité du procédé il faut changer la vitesse d'amincissement. Plus on aminci rapidement plus la surface finale sera rugueuse. La vitesse de rotation du plateau à gaufres quant à elle n'a pas d'influence significative sur la rugosité. Nous avons également montré que l'amincissement améliore la TTV de la gaufre. Par la suite, nous avons démontré la possibilité d'amincir de petits échantillons en Silicium avec un collage sur gaufres de 4po.

Le procédé d'amincissement a été transféré sur des échantillons plus fragiles se composant de III-V sur substrat de Germanium. Toutes les étapes de ce procédé, c'est-à-dire le collage temporaire sur Silicium, l'amincissement abrasif et le report métallique permanent, ont été développées et validées laissant apparaître certaines contraintes comme une épaisseur critique d'amincissement de $20\text{ }\mu\text{m}$ de Germanium restant après abrasion ou encore une rugosité de surfaces d'environ $200\text{ }\mu\text{m } R_a$. Nous avons vu que la planéité du collage était un paramètre très important à contrôler pour ne pas endommager la cellule lors de l'amincissement.

Nous avons enfin effectué le report d'une cellule photovoltaïque triple-jonction et nous avons pu mesurer ses caractéristiques I-V. Celle-ci est fonctionnelle, bien qu'une perte de Voc de 100 mV ait été observée, certainement dû à de légers courts circuits. L'origine de ces courts circuits est attribuée à la présence de fissures sur la cellule qui suivent la direction des stries de l'amincissement abrasif. Les conditions d'amincissement doivent encore être étudiées pour éviter l'apparition de ses fissures pour la fabrication d'une cellule amincie à moins de $100\text{ }\mu\text{m}$ de Germanium. Il sera sans doute pertinent d'explorer la potentielle corrélation entre la présence des fissurations et les métallisations de la cellule.

Nous avons réussi à mettre en place un protocole d'amincissement abrasif avec des abrasifs de diamètre moyen de $46\text{ }\mu\text{m}$. Les contraintes dû à l'endommagement des cellules par le procédé abrasif constituent les limites à son application. Cependant une réduction de la taille des abrasifs pourrait contribuer à relâcher ses contraintes en endommageant moins la cellule. L'amincissement par meulage comme vu tout au long de ce document pourrait

constituer une première étape d'amincissement grossière qui pourrait être suivi par une étape d'amincissement plus fine avec de la CMP. Cela pourrait permettre d'atteindre des épaisseurs de substrat inférieur à 10 μm et démontrer l'intérêt des cellules minces notamment dans l'application au recyclage de substrat.

ANNEXE A

Guide d'utilisateur

Guide d'utilisation du grinder : MPS 2 R400 DS



Salle 1174 du LCSM

Responsable du local :

Walid Hassen, #65765, Mohamed.Walid.Hassen@USherbrooke.ca

René Labrecque #65684, Rene.Labrecque@USherbrooke.ca

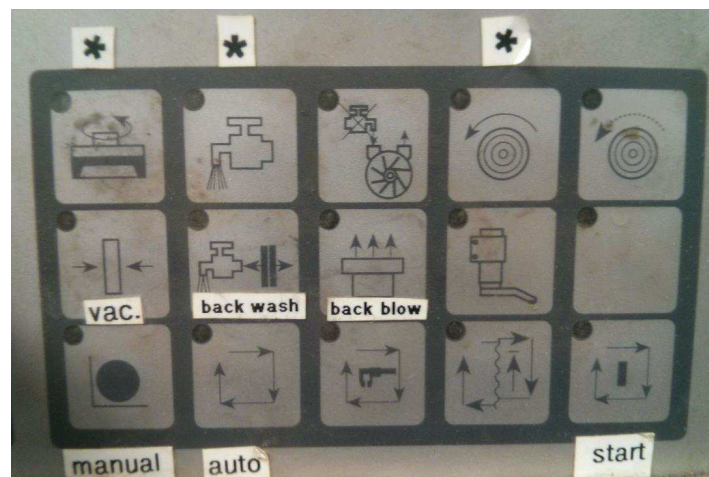
Responsable du grinder :

Serge Ecoffey, Serge.Ecoffey@USherbrooke.ca

Manuel d'utilisation :

[\\sonny.3it.usherbrooke.ca/CRN2/Public/Grinder MPS 2 R400 DS](http://sonny.3it.usherbrooke.ca/CRN2/Public/Grinder MPS 2 R400 DS)


Panneaux de contrôle :



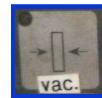
Fonctionnement :

- 1) Ouvrir l'arrivée d'eau (eau de la ville) située au fond de la salle derrière le dicer.



- 2) Allumer la machine à grinder en tournant le bouton rouge en bas à droite des panneaux de contrôle, puis désenclencher le bouton d'arrêt d'urgence (on a pris l'habitude d'enclencher le bouton d'arrêt d'urgence une fois la machine éteinte pour éviter les problèmes au démarrage). Si le bouton  clignote, assurez-vous d'avoir ouvert l'arrivée d'eau et cliquer dessus.

Placer les wafers sur leurs supports, refermer le couvercle puis cliquer sur le bouton du vacuum



- 3)




Si vous avez moins de 4 wafers à amincir, placer du tape sur les supports non utilisés pour boucher le vide.

Si vous voulez amincir un petit échantillon, le coller sur un wafer 4po.

- 4) Déplacer la colonne à droite jusqu'à la butée puis refermer la molette située en haut à droite de la colonne et fermer la vitre de protection.




5) La machine dispose de deux programmes présentement utilisables :

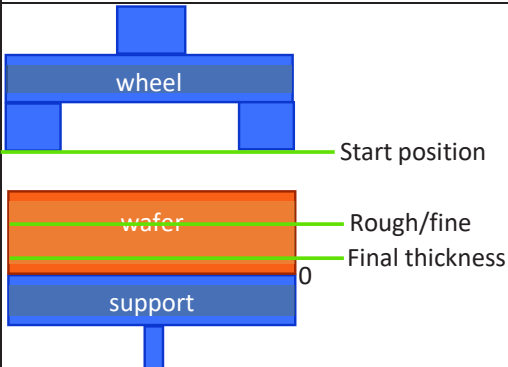
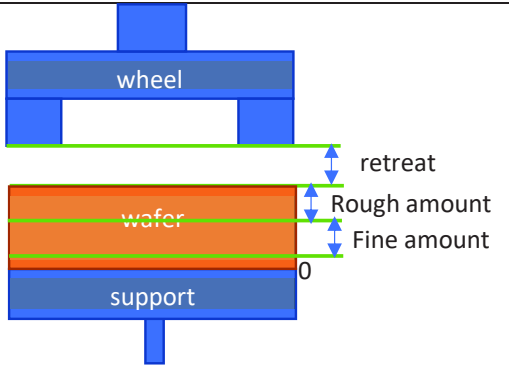






Entrer dans la sélection des programmes en cliquant sur  puis naviguer à travers le menu des programmes et choisissez celui qui vous convient parmi ; StepCon (programme 1) et Const-Amount (programme 3) en cliquant sur :


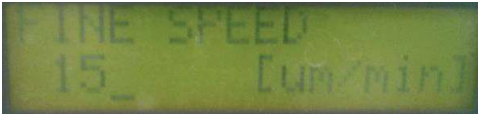
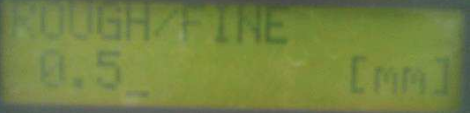








Si vous connaissez l'épaisseur de votre wafer, le programme **StepCon** sera le plus adapté, sinon préférez le programme **Const-Amount**

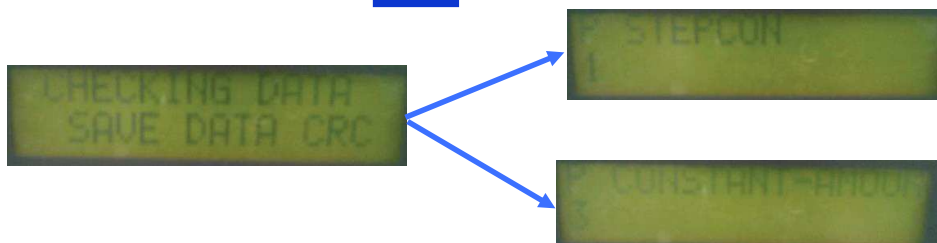
Les deux autres programmes, nécessitant l'unité de mesure que nous ne possédons pas, sont inutilisables.

Voici les différents paramètres de chaque programme, entrer les valeurs de chaque paramètre et valider avec  à noter que le zero est fait au niveau supérieur du support.

StepCon	Const-Amount
	
<p>NEW : SET [1-5]</p>  <p>Choisir le set avec</p>  <p>(par défaut choisir 1)</p> <p>START POSITION [mm]</p>  <p>ROUGH SPEED [$\mu\text{m}/\text{min}$]</p>	<p>ROUGH AMOUNT [mm]</p>  <p>ROUGH SPEED</p>  <p>FINE AMOUNT [mm]</p> 

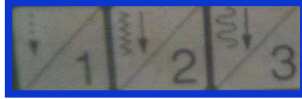
 <p>ROUGH/FINE [mm]</p>	<p>FINE SPEED [$\mu\text{m}/\text{min}$]</p> 
 <p>FINE SPEED [$\mu\text{m}/\text{min}$]</p>	<p>SPARK OUT [s]</p> 
 <p>FINAL THICKNESS [mm]</p>	<p>Spark-out = temps où la tête tourne sans descendre</p>
 <p>SPARK OUT [s]</p>	<p>RETURN</p> 
 <p>Spark-out = temps où la tête tourne sans descendre</p>	
<p>THICKNESS CORR. [μm]</p>  <p>Valeur d'épaisseur que l'on peut corriger</p>	

6) Maintenant cliquer sur  vous devriez obtenir :





7) Cliquer une nouvelle fois sur  le programme est maintenant sélectionné.

8)

- Si vous avez choisi le programme **Constant Amount**, descendre la colonne jusqu'à ce que la tête du grinder touche légèrement le wafer avec 

- Si vous avez choisi le programme **StepCon**, vous n'avez rien à faire, passer à l'étape 10).

9) Cliquer sur  pour activer le mode automatique puis sur 


10) Vous avez confirmé votre choix de programme cliquer sur  pour l'exécuter.

11) Une fois terminé :

- Ouvrir la vitre protectrice.
- Décaler la colonne sur la gauche.
- Relever le couvercle.
- Eteindre le vacuum.
- Récupérer le wafer.
- Eteindre la machine (appuyer sur le bouton d'arrêt d'urgence).
- Fermer l'arrivée d'eau.

Mise à 0 de la tête :

1) Descendre la tête jusqu'à ce qu'elle soit légèrement en contact avec le support à wafer

2) Cliquer sur 

3) Indiquer le chiffre 0 et cliquer sur entrer 

Tête d'amincissement disponibles :

Tête 1: 90-00625-0101 Diamond Grinding Wheel D46 C50 resin bond Ø 200 mm

Grit en Diamant de 46 μm de diamètre en moyenne, lié dans une résine. La concentration en abrasif est de 50% de concentration.

Tête 2: 90-00625-0132 Diamond Grinding Wheel D91 C50 resin bond Ø 200 mm

Grit en Diamant de 91 μm de diamètre en moyenne, lié dans une résine. La concentration en abrasif est de 50% de concentration.

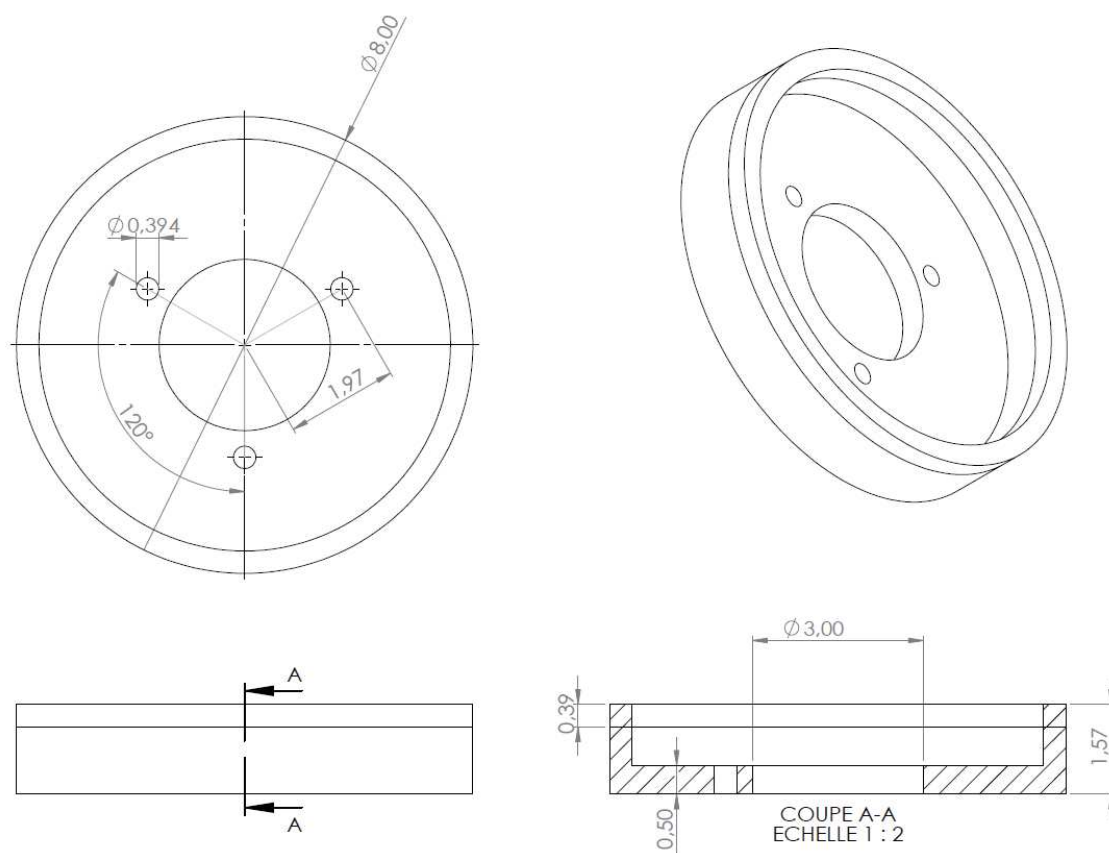


Figure 1 Dessin de la tête d'amincissement, échelle en pouces

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] N.H. Karam, R.R. King, B.T. Cavicchi, D.D. Krut, J.H. Ermer, M. Haddad, Li Cai, D.E. Joslin, M. Takahashi, J.W. Eldredge, W.T. Nishikawa, D.R. Lillington, B.M. Keyes, and R.K. Ahrenkiel. Development and characterization of high-efficiency Ga_{0.5}In_{0.5}p/GaAs/Ge dual- and triple-junction solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 46(10) :2116–25, October 1999.
- [2] Natalya V Yastrebova. High-efficiency multi-junction solar cells :. page 22.
- [3] I.Rey-Stolle C.Algora. *Handbook on Concentrator Photovoltaic Technology*. Wiley, 2016.
- [4] H. Yoon, K.M. Edmondson, G.S. Kinsey, R.R. King, P. Hebert, R.K. Ahrenkiel, B.T. Cavicchi, and N.H. Karam. Minority carrier lifetime and radiation damage coefficients of germanium. In *Conference Record of the Thirty-First IEEE Photovoltaic Specialist Conference (IEEE Cat. No. 05CH37608)*, pages 842 – 5, Piscataway, NJ, USA, 2005.
- [5] L. E. Vorobyev. *Handbook Series on Semiconductor Parameters*. M.Levinshtein, S.Rumyantsev, and M.Shur, World Scientific, 1963.
- [6] D.J. Aiken. InGaP/GaAs/Ge multi-junction solar cell efficiency improvements using epitaxial germanium. *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 2000 (Cat. No.00CH37036)*, pages 994–7, 2000.
- [7] O. Richard, A. Jaouad, B. Bouzazi, R. Arès, S. Fafard, and V. Aimez. Simulation of a through cell via contacts architecture for hcpv multi-junction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144 :173 – 180, 2016.
- [8] C-W. Cheng, K-T. Shiu, N. Li, S-J. Han, L. Shi, and D. K. Sadana. Epitaxial lift-off process for gallium arsenide substrate reuse and flexible electronics. *Nature Communications*, 4 :1577, March 2013.
- [9] S. W. Bedell, D. Shahrjerdi, B. Hekmatshoar, K. Fogel, P. A. Lauro, J. A. Ott, N. Sosa, and D. Sadana. Kerf-less removal of Si, Ge, and III-V layers by controlled spalling to enable low-cost pv technologies. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2(2) :141–147, April 2012.
- [10] M. M. Wilkins, A. Boucherif, R. Beal, J. E. Haysom, J. F. Wheeldon, V. Aimez, R. Arès, T. J. Hall, and K. Hinzer. Multijunction solar cell designs using silicon bottom subcell and porous silicon compliant membrane. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(3) :1125–1131, July 2013.
- [11] H.Mathieu and H.Fanet. *Physique des semiconducteurs et des composants électronique*. DUNOD, 2009.
- [12] S. Schicho. Effect of substrate thinning on the performance of III-V/Ge solar cells for CPV. *8th International Conference on Concentration Photovoltaic Systems*, 2012.
- [13] C. Colin, A. Jaouad, M. Darnon, M. De Lafontaine, M. Volatier, A. Boucherif, R. Arès, S. Fafard, and V. Aimez. The handling of thin substrates and its potential for new architectures in multi-junction solar cells technology. *AIP Conference Proceedings*, 1881(1) :040001, September 2017.

-
- [14] P. Alan Jones and Brian R. Spence. Spacecraft solar array technology trends. In *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, volume 26, pages 17 – 28, 2011.
 - [15] R. Contini, E. Ferrando, D. Hazan, R. Romani, R. Campesato, M. C. Casale, and G. Gabetta. Comparison between CIGS and triple junction GaAs on thin Ge solar cell assemblies and related development strategies. In *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, PVSC 2008, May 11, 2008 - May 16, 2008*, Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, page Electron Devices Soc. (EDS) Inst. Electr. Electron. Eng. (IEEE). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2008.
 - [16] G. F. Zheng, Z. Shi, R. Bergmann, X. Dai, S. Robinson, A. Wang, J. Kurianski, and M. A. Green. Thin film silicon solar cells on glass by substrate thinning. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 32(2) :129–135, February 1994.
 - [17] A. Phommahaxay, G. Verbinnen, S. Suhard, P. Bex, J. Pancken, M. Lismont, A. Van den Eede, A. Jourdain, T. Woitke, P. Bisson, W. Spiess, B. Swinnen, G. Beyer, A. Miller, and E. Beyne. Temporary wafer bonding defect impact assessment on substrate thinning : Process enhancement through systematic defect track down. In *2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference*, pages 1255–1259, May 2012.
 - [18] C. Laucher, C. Colin, M. de Lafontaine, F. Melul, M. Volatier, M. Darnon, V. Aimez, and A. Jaouad. Permanent bonding process for III-V/Ge multijunction solar cell integration. *AIP Conference Proceedings*, 2012(1) :090004, 2018.
 - [19] T. K. Carns, M. O. Tanner, and K. L. Wang. Chemical etching of $Si_{1-x}Ge_x$ in $hf : h_2o_2 : ch_3cooh$. *J. Electrochem. Soc.*, 142(4), 2017.
 - [20] Usinage par abrasion - Analyses expérimentale et théorique. techniques de l'ingénieur.
 - [21] Usinage par abrasion - Principes généraux - Rhéologie des corps et conséquences sur les mécanismes d'enlèvement de matière. techniques de l'ingénieur.
 - [22] L.E. Vorobyev. Germanium (Ge). In *Handbook series on semiconductor parameters*, volume 1, pages 33–57.
 - [23] T. Mori. Us patent 4693036. semiconductor wafer surface grinding apparatus, 1987.
 - [24] I. Miyoshi K. Nishio M. Nishiguchi, T. Sekiguchi. Us patent 5035087. surface grinding machine, 1991.
 - [25] S. Tabuchi. Us patent 4481738. grinding machine, 1991.
 - [26] P.-L. Tso and C.-C. Teng. A study of the total thickness variation in the grinding of ultra-precision substrates. *Journal of Materials Processing Technology*, 116(2-3) :182–188, 2001.
 - [27] W. Sun, Z. J. Pei, and G. R. Fisher. Fine grinding of silicon wafers : a mathematical model for the wafer shape. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(7) :707 – 716, 2004.
 - [28] Alan Strasbaugh Z.J. Peia. Fine grinding of silicon wafers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39 :1103—1116, 2001.
-

-
- [29] V.C. Venkatesh, S. Izman, S. Sharif, T.T. Mon, and M. Konneh. Ductile streaks in precision grinding of hard and brittle materials. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 28(5) :915–924, 2003.
- [30] S. Miura Z.J. Pei, S.R. Billingsley. Grinding induced subsurface cracks in silicon wafers. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39 :1103–1116, 1999.
- [31] I. Zarudi and L.C. Zhang. Effect of ultraprecision grinding on the microstructural change in silicon monocrystals. *Journal of Materials Processing Technology*, 84(1-3) :149–158, 1998.
- [32] F. Inoue, A. Jourdain, L. Peng, A. Phommahaxay, J. De Vos, K.J. Rebibis, A. Miller, E. Sleenckx, E. Beyne, and A. Uedono. Influence of Si wafer thinning processes on (sub)surface defects. *Applied Surface Science*, 404 :82–87, 2017.
- [33] Z. Zhang, Y. Huo, and D. Guo. A model for nanogrinding based on direct evidence of ground chips of silicon wafers. *Science China Technological Sciences*, 56(9) :2099–2108, 2013.
- [34] L.C. Zhang I. Zarudi. Effect of ultraprecision grinding on the microstructural change in silicon monocrystals. *Journal of Materials Processing Technology*, 84(1-3) :149–158, 1998.
- [35] Y.Y.Wang X.Lv, J.L.Yuan and Q.F.Deng. Study on parameters optimization in ultra-precise processing of germanium substrate. *Advanced Materials Research*, 69–70 :442–445, 2009.
- [36] A. Jourdain, T. Buisson, A. Phommahaxay, M. Privet, D. Wallace, S. Sood, P. Bisson, E. Beyne, Y. Travaly, and B. Swinnen. 300mm wafer thinning and backside passivation compatibility with temporary wafer bonding for 3d stacked IC applications - IEEE Conference Publication.
- [37] P.T. Baine, H.S. Gamble, B.M. Armstrong, D.W. McNeill, S.J.N. Mitchell, Y.H. Low, and P.V. Rainey. Germanium on sapphire by wafer bonding. *Selected Papers from the EUROSIOI '08 Conference*, 52(12) :1840–1844, December 2008.
- [38] Organisation internationale de normalisation (ISO). Spécification géométrique des produits (gps) – État de surface : Méthode du profil – termes, définitions et paramètres d’état de surface, 1997.
- [39] Systèmes de mesure de rugosité de jenoptik – paramètres d’états de surface en pratique. url : <https://www.jenoptik.com/sites/france>.
- [40] B. K. Wang, L. Tsai, A. Shorey, A. Lee, J. Su, and J. McCutcheon. Metrologies for characterization of flatness and thickness uniformity in temporarily bonded wafer stacks. In *2012 7th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)*, pages 263 – 6, Piscataway, NJ, USA, 2012.
- [41] T. M. Buck and F. S. McKim. Depth of Surface Damage Due to Abrasion on Germanium. *Journal of The Electrochemical Society*, 103(11) :593, 1956.
-

